

Abriss

einer

Geschichte der Fortschritte

und

des gegenwärtigen Zustandes

der

physischen Optik.

Von

Humphrey Lloyd, A. M., M. R. J. A.

Mitglied des Trinity College, und Professor der Naturphilosophie und der experimentellen Naturwissenschaften an der Universität Dublin.

Aus dem

Report of the fourth Meeting of the British Association for the Advancement of Science. London 1835.

übersetzt

und mit ergänzenden Anmerkungen versehen

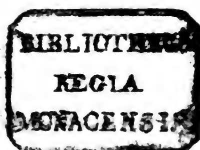
von

G. A. Kloeden.

Berlin,

bei C. G. Lüderitz.

1836.



Inhalt.

Berichtigungen.

Seite	60	Zeile	14	v. o.	statt Entstehung lies Entfernung.
-	78	-	1	v. u.	statt einem lies einer.
-	93	-	18	v. o.	statt die lies der
-	130	-	12	v. u.	statt von lies auf
-	139	-	5	v. o.	statt FREMAT lies FERMAT
-	141	-	3	v. o.	statt zweien lies zwei

Einleitung.

In vorliegender Arbeit habe ich den jetzigen Zustand unsers Wissens von der physikalischen Theorie des Lichtes und die allmäligen Fortschritte, welche in den letzten Jahren zur Begründung derselben gemacht worden sind, etwas genauer zu betrachten versucht. Die Methode, welche ich dabei für die passendste gehalten habe, ist, zunächst einen schnellen Ueberblick über die verschiedenen Hauptarten optischer Phänomene zu geben, welche durch die Bemühungen der experimentellen Forscher in so reichem Maasse zum Vorschein gekommen sind, und alsdann zu untersuchen, wieweit man sie auf die eine oder die andere der beiden geltenden Theorien zurückzuführen im Stande ist, welche allein Anspruch darauf machen können, von uns berücksichtigt zu werden. Dies ist in der That der einzige Weg, auf welchem die Richtigkeit einer physikalischen Theorie nachgewiesen werden kann, und der Beweis, welcher für sie entscheidet, ist wesentlich die Menge von Thatsachen, mit denen sie übereinstimmt.

Aber wenn wir nun diese Vergleichung anstellen, so ist es nicht genug, bei vaguen Erläuterungen stehen zu bleiben, welche man so zurichten kann, dass sie irgend einer Theorie gemäss sind. Eine Hypothese mag noch so einfach scheinen, sie mag bekannten Gesetzen noch so analog sein,

von ihrer Richtigkeit kann man nur vollständig überzeugt sein, und die Streitigkeiten als abgethan betrachten, wenn sie einen mathematischen Ausdruck zulässt und wenn die Folgerungen, welche man auf mathematischem Wege aus ihr zieht, numerisch mit begründeten Thatsachen verglichen werden können [1]). Aus diesem Gesichtspunkte betrachtet, scheint nun die Wellentheorie des Lichtes fast, wenn nicht ganz, einen Punkt der Vollkommenheit erreicht zu haben, welcher vielleicht dem, auf welchen die Theorie der allgemeinen Gravitation allein durch NEWTON erhoben wurde, nicht nachsteht. Mannigfache und umfassende Klassen von Erscheinungen sind Folgerungen aus ihr, und wo ihre Fortschritte noch aufgehalten wurden, da muss man es grossen Theils der Unvollkommenheit jenes schwierigen Theiles der Analysis zuschreiben, dessen man zur Erklärung bedarf. Die Principien der Emissionstheorie andrerseits sind in verhältnissmässig wenigen Fällen mathematisch ausgedrückt und entwickelt worden, und demnach zeigt diese Theorie nur selten jene Berührungspunkte mit der experimentellen Richtigkeit, nach welchen sie allein gerechtfertigt werden kann.

Den grossen Unterschied im heutigen Zustande beider Theorien haben einige einer Verschiedenheit des intellektuellen Vermögens derer, von welchen sie bearbeitet wurden, zugeschrieben, und man hat behauptet, dass die NEWTON'sche Theorie, wenn sie mit demselben Eifer und denselben Talenten als die HUYGENS'sche verfolgt worden wäre, sich wohl gleicher Triumphe zu rühmen gehabt haben würde. Ich gestehe, dass mir diese Annahme völlig unhaltbar scheint. Hinsichtlich jener Behauptung wird es genügen zu bemerken, dass sowohl NEWTON als LA PLACE sich mit ein und derselben Seite dieser Frage beschäftigten, und ich glaube

1) *C'est en tirant des formules les conséquences les plus subtiles et les plus eloignées des principes, puis allant les vérifier par l'expérience, que l'on peut réellement s'assurer si une théorie est vraie ou fausse, et si l'on doit s'y confier comme à un guide fidèle, ou la rejeter comme un système trompeur.* — BIOT, *Traité de Physique, tom. I. pag. XIV.*

hinzufügen zu können, dass unter den Vertretern der Wellentheorie des Lichtes wenige sind, welche nicht anfangs eine Vorliebe für die Emissionstheorie in sich zu bekämpfen gehabt hätten. Mit der Natur und den Gesetzen der Wurfbewegung (*projectile*) ist jeder Freund der mechanischen Wissenschaften viel vertrauter, als mit denen der wellenförmigen Fortpflanzung, und der triumphirende Führer des ersteren Zweiges dieser Wissenschaft, in ihrer Anwendung auf die Bewegungen der Himmelskörper, ist allein hinreichend, einem jeden eine Theorie annehmlich zu machen, welche vorschlägt, die Erscheinungen des Lichtes nach ähnlichen Principien zu erklären. Was endlich die Meinung selbst betrifft, so scheint es höchst unwahrscheinlich, dass zwei so weit von einander getrennte Theorien bei ihrer Erklärung der Phänomene Hand in Hand gehen sollten. Und doch giebt es Einen Fall dieser Art, der sehr schlagend ist: die Grundgesetze der Reflexion und Refraction folgen genau und nothwendig aus jeder der beiden Theorien; aber ich glaube, dass ihre Geschichte kein ähnliches Beispiel zeigt.

Indessen kann eine unfruchtbare Theorie durch Hinzufügung neuer Hypothesen fruchtbar gemacht werden. Durch solche nachhelfende Principien kann sie dazu gebracht werden, mit der experimentellen Wissenschaft Schritt zu halten, und scheinbar der durch hinzugekommene neue Erscheinungen gesteigerten Nothwendigkeit einer klaren Einsicht zu entsprechen. Aber eine so überladene Theorie verdient nicht einmal den Namen; sie ist ein Vereinigen von unzusammenhängenden Principien, welche höchstens nur als Ergänzung zu den Materialien für eine höhere Verallgemeinerung betrachtet werden können. Ihre sehr complicirte Natur lässt uns von vorn herein an ihrer Richtigkeit zweifeln: denn je höher wir auf der Leiter physikalischer Induktion zu steigen vermögen, um so mehr nehmen wir jene Harmonie, jene Einheit und Ordnung wahr, welche in den Werken des erhabenen Schöpfers walten muss. Die Emissionstheorie

zeigt in ihrem gegenwärtigen Zustande alle jene Symptome der Schwäche; aber es giebt noch etwas Gegründeteres gegen sie, als ein Zweifeln von vorn herein. Ich meine, bei einer genauen Prüfung wird sich ergeben, dass in fast allen Fällen, wo man sie angewendet hat, ihre Folgerungen mit den Thatsachen nicht übereinstimmen, und der Beweis ihrer Unzulänglichkeit scheint sogar noch unumstösslicher, als die positive Augenscheinlichkeit zu Gunsten der zweiten Theorie.

Bei der Betrachtung jener Gründe habe ich es für nothwendig erachtet, von der Ordnung, welche eine strenge theoretische Ansicht dieses Gegenstandes naturgemäss erheischen würde, abzuweichen. Die Beziehung der Theorie zu dem Phänomen, welche ich zu betrachten beabsichtige, nöthigt mich, Letztere in den Gruppen, in welche sie gewöhnlich zusammengeordnet werden, und unter welchen ihre Gesetze erforscht wurden, zu untersuchen. Ich will deshalb diese Arbeit in zwei Theile theilen, von denen der erste vom unpolarisirten und der zweite vom polarisirten Lichte handeln soll. In jenem werde ich gesondert betrachten:

1) Die Fortpflanzung des Lichtes und das Princip der Interferenz.
2) Die Reflexion und Refraction des Lichtes.
3) Diffraction.
4) Die Farben dünner und dicker Blättchen.

Der zweite Theil wird befassen:

1) Die Polarisation des Lichtes und die Lehre von den transversalen Schwingungen.
2) Die Reflexion und Refraction des polarisirten Lichtes.
3) Die doppelte Brechung.
4) Die Farben von Krystallplatten.

Bei dieser Anordnung fallen viele Gegenstände von hohem Interesse fort, da sie nur entfernt mit dem Hauptgegenstande in dieser Arbeit zusammenhangen. Ich habe aus diesem Grunde jenen Theil der Optik, welcher bisweilen mathematische Optik genannt wird, oder die Entwickelung der Grundgesetze der Reflexion und Refraction gänzlich un-

berührt gelassen. Die Phänomene des Sehens sind gleichfalls fortgeblieben, als zur Physiologie gehörig, und die Beziehungen des Lichtes zu andern Agentien, wie zur Wärme, zur Elektricität und zum Magnetismus, weil diese Beziehungen noch ziemlich dunkel, und beim gegenwärtigen Zustande der verwandten Wissenschaften die Lehre vom Lichte nur Wenig von deren Prüfung hoffen kann. Diese interessanten Gegenstände würden, ein jeder für sich, wohl eine gesonderte Betrachtung verdienen.

Erster Theil.

Unpolarisirtes Licht.

1. Fortpflanzung des Lichtes. Princip der Interferenz.

Die erste Eigenschaft des Lichtes, welche wir kennen müssen, ist seine fortschreitende Bewegung. Wir wissen, dass das Licht zu seiner Bewegung von einem Punkte des Raumes zu einem andern Zeit nöthig hat, und zwar, dass es sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 42000 Meilen in einer Sekunde bewegt. Die Frage nach der Art dieser Fortpflanzung schliesst die nach der Natur des Lichtes selbst in sich.

Es giebt zwei bestimmte und denkbare Wege, sich eine solche Bewegung vorzustellen. Entweder ist es ein und derselbe Körper, welcher sich zu verschiedenen Zeiten an verschiedenen Punkten im Raum befindet, oder es sind eine Menge in Bewegung begriffener Körper vorhanden, welche den ganzen Zwischenraum ausfüllen, und von denen ein jeder beständig innerhalb gewisser Grenzen vibrirt, während diese schwingende Bewegung sich von einem zum andern mittheilt, und so gleichförmig fortschreitet. Die Natur bietet uns zahlreiche Beispiele sowohl von der einen Art dieser fortschreitenden Bewegung, als von der andern, und je nachdem wir die eine oder die andere derselben zur Erklärung der Phänomene des Lichtes annehmen, gerathen wir in das eine oder das andere der beiden gültigen Systeme, in Newtons oder Huygens Theorie.

Die NEWTON'sche Theorie, nach welcher man gewöhnlich zu erklären versucht, ist ohne Zweifel einfacher zu begreifen, als die HUYGENS'sche: aber diese Einfachheit ist nur scheinbar. NEWTON selbst war ein viel zu klarer Kopf, als dass er geglaubt hätte, man könne mit Hülfe jener Kräfte der Anziehung und Abstossung, vermittelst welcher die Lichtmolekeln nach der Annahme gebrochen oder reflektirt werden, alle Erscheinungen erklären, und es ist merkwürdig, dass er, als er anfing über die physikalische Theorie des Lichtes nachzudenken, es für nothwendig erachtete, alle zur Theorie der Wellen erforderlichen Beihülfen aufzunehmen. In der That fühlte NEWTON, und sagt es ausdrücklich, dass die Schwingungen eines ätherischen Mediums zu seiner Hypothese nothwendig seien [1]), obgleich er läugnet, dass diese Schwingungen das Licht ausmachen. Er ging sogar noch weiter, und behauptete, sie seien die Haupt- und wesentlichen Theile jener Theorie, indem die von leuchtenden Körpern ausgehenden Molekeln nur dazu dienen, diese Schwingungen zu erregen, wie in Wasser geworfene Steine Wellen hervorbringen [2]). Auf der andern Seite nimmt er von den Molekeln selbst an, sie würden durch eine schwingende Bewegung der Theilchen des leuchtenden Körpers ausgeschickt [3]), durch dieselbe schwingende Bewegung, obwohl mit andrer Energie wirkend, von der er annimmt, in ihr bestehe die Wärme. Es würde also schei-

---

1) *Phil. Trans.* 1692.

2) Wenn ich eine Hypothese annehmen sollte, so müsste sie, wenn sie allgemein sein sollte, so beschaffen sein, dass sie nicht erklärte, was Licht sei, sondern sagte, es sei irgend Etwas, das im Stande ist, Schwingungen im Aether zu erregen; denn alsdann wäre es so allgemein und andere Hypothesen umfassend, dass wenig übrig bliebe, neue zu erfinden. *BIRCH's History of the Royal Society. Vol. III. p.* 249. [KAEMTZ hat (SCHWEIGGER's Journal XLV. p. 176) NEWTON's Aeusserungen zusammengestellt, welche auf die Erklärung der Erscheinungen nach der Vibrationstheorie hindeuten. A. d. Ueb.]

3) *Optice Quaes.* 8.

nen, als nähme NEWTON **zu viel** an, und verstiesse gegen seine schätzbare Regel: *Causas rerum naturalium non plures admitti debere etc.* Hätte er ganz einfach den molekularen Theil seiner Hypothese fortgelassen, und angenommen, die Schwingungen seines ätherischen Mediums würden **direkt** durch die des leuchtenden Körpers erregt, so würde sich seine Theorie von selbst in die HUYGENS'sche und HOOKE'sche aufgelöst haben. Man muss hierbei bemerken, dass NEWTON wirklich für die **strahlende Wärme** die Wellentheorie angenommen hat, und dass er nicht glaubte, diese würde durch die Uebertragung materieller Theilchen, sondern durch die Schwingungen eines ätherischen Mediums fortgepflanzt [1]).

Der besondere Theil der Emissionstheorie, — die Annahme, dass die Lichtstrahlen mit grosser Geschwindigkeit ausgeworfene Körper seien, scheint wohl ein leichtes Criterium ihrer Wahrheit abzugeben. Wenn das Gewicht eines Lichtmolekels einen Gran betrüge, so würde sein Moment gleich dem einer Kanonenkugel von 150 Pfund Gewicht sein, und es würde sich mit einer Geschwindigkeit von 1000 Fuss in einer Sekunde fortbewegen. Das Gewicht eines einzigen Molekels kann viele Millionen Mal geringer angenommen werden; aber andrerseits kann man machen, dass Millionen solcher Molekeln zusammen wirken, indem man sie in den Brennpunkt von Linsen oder Spiegeln concentrirt, und die Wirkung ihres Impulses müsste, wie man erwarten sollte, auf diese Weise bemerkbar gemacht werden. Auf diesen einfachen Beweis der Materialität des Lichtes berief man sich lange Zeit. HOMBERG's Versuche schienen das Vorhandensein einer bemerkbaren Schlagähnlichen Wirkung bestätigt zu haben; aber als diese Versuche von MAIRAN und DUFAY wiederholt wurden, führten sie zu dem entgegengesetzten Schluss. Die in noch späterer Zeit von MICHELL erhaltenen Resultate, bei wel-

1) *Optice Quaes.* 18.

chen zugleich feinere Apparate als je zuvor angewendet wurden, schienen zu Gunsten der Materialität des Lichtes entscheidend [1]). Die bei diesen Versuchen beobachteten Wirkungen sind jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit auf Luftströmungen zurückgeführt, welche durch die ungleiche Temperatur entstanden, oder selbst auf eine Verschiedenheit in der Elasticität der Luft, wo sie mit den einander entgegengesetzten Oberflächen des Körpers, auf welchen die Einwirkung geschah, in Berührung war [2]). Die darauf folgenden Versuche von BENNET wurden unter weit günstigeren Umständen angestellt, und besonders sind sie, da sie im luftleeren Raume wiederholt wurden, von den angeführten Quellen des Irrthums unabhängig. Ihr Endresultat war das Nichtvorhandensein einer bemerkbaren Wirkung [3]).

Der vom Mangel eines merklichen Momentes hergenommene Einwurf gegen die Materialität des Lichtes wurde zuerst von FRANKLIN vorgebracht. HORSLEY suchte die Schwierigkeit fortzuräumen [4]); aber seine mühsamen arithmetischen Berechnungen beweisen nur, dass die Lichttheilchen, wenn sie materiell wären, von der äussersten Kleinheit sein müssten. Man muss zugleich gestehen, dass Einwürfe dieser Art von wenig Gewicht sind. Man kann leicht den Lichtmolekeln eine Kleinheit beilegen, welche hinreicht, dass sie jedem Mittel trotzen, welches wir besitzen, ihr Beharrungsvermögen durch ihre Wirkungen auf andere Körper zu entdecken; und aus welchem Gesichtspunkte wir auch die optischen Phänomene betrachten mögen, so sind wir immer gezwungen, Quantitäten zu betrachten, welche unermesslich vielmal kleiner sind, als alles, an das sich die Einbildung gewöhnt hat.

---

1) PRIESTLEY's Geschichte der Optik, übersetzt von KLUEGEL, pag. 282.

2) *YOUNG: On the Theory of Light and Colours. Phil. Trans.* 1801.

3) *Phil. Trans.* 1792.

4) *Ibid.* 1770. *I.*

Die Aberration des Lichtes der Fixsterne, welche von der Bewegung der Erde und der des Lichtes herrührt, ist eine leichte Folgerung aus der Emissionstheorie, wobei man annimmt, diese Bewegungen geschähen unabhängig von einander. Um dies Phänomen nach der Wellentheorie zu erklären, scheint die Annahme nothwendig, dass der Aether, welcher unsere Erde umgiebt, nicht an ihrer Bewegung Theil nehme, so dass der durch jene relative Bewegung hervorgebrachte Strom freien Durchgang durch die feste Masse der Erde habe; oder dass mit YOUNG's Worten „der Lichtäther alle materiellen Körper mit geringem oder gar keinem Widerstande durchdringt, so frei etwa, wie der Wind durch das Laub eines Baumes geht [1]). FRESNEL hat dieselbe Meinung behauptet, und so überraschend die Annahme anfangs scheint, so hat er doch sehr klar gezeigt, dass kein gültiger Beweis dagegen aufgebracht werden kann, der auf die Undurchsichtigkeit der Masse gegründet wäre, welche nach der Annahme vom Aether durchdrungen wird [2]).

Die Entdeckungen von BRADLEY und ROEMER haben, mit einander verglichen, zu einem weiteren und höchst wichtigen Schluss über das Licht geführt, nämlich, dass seine Schnelligkeit ein und dieselbe sei, was auch die leuchtende Quelle sein mag; das Licht der Sonne, der Fixsterne, der Planeten und ihrer Trabanten pflanzt sich mit ganz derselben Geschwindigkeit fort. Man muss gestehen, dass dieser Schluss für die Emissionstheorie eine gewaltige Schwierigkeit bietet. LA PLACE hat gezeigt, dass wenn der Durchmesser eines Fixsternes 250 Mal so gross, als der der Sonne wäre, und beider Dichtigkeiten wären dieselben, so würde seine Anziehung hinreichen, das ganze Moment der ausgeschickten Molekeln zu überwinden, und der Stern würde

---

1) *Experiments and Calculations relative to Physical Optics. Phil. Trans.* 1803.

2) *Sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques Phénomènes d'Optique. Annales de Chimie tom. IX.*

auf grosse Entfernungen unsichtbar sein[1]). Bei einer kleineren Masse wird eine entsprechende Verzögerung statt finden, so dass die Endgeschwindigkeiten verschieden sein werden, wie auch die Anfangsgeschwindigkeiten gewesen sein mögen. Arago's Vorschlag scheint das einzige Mittel abzugeben, diese Schwierigkeit zu umgehen. Man kann annehmen, die Lichtmolekeln seien ursprünglich mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten ausgeworfen, aber unter diesen Geschwindigkeiten befinde sich nur eine, welche unsern Gesichtsorganen angemessen ist, und welche die Empfindung des Lichtes hervorbringt. Diese Annahme scheint durch die Entdeckungen von Herschel, Wollaston und Ritter über die unsichtbaren Strahlen des Spectrums unterstützt; aber sie scheint nicht leicht mit einer der Hypothesen über die Natur des Sehens, welche wir aufzustellen im Stande sind, zu vereinigen. Jene Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit ist auf der andern Seite eine nothwendige Folge der Principien der Wellentheorie. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine schwingende Bewegung in einem elastischen Medium fortpflanzt, hängt allein von der Elasticität jenes Mediums und seiner Dichtigkeit ab, und wenn diese in den weiten Räumen, welche die materiellen Körper des Universums trennen, gleichförmig ist (und man kann es kaum anders annehmen), so muss die Schnelligkeit dieselbe sein, was auch die ursprüngliche Quelle sein mag.

Die geradlinige Bewegung des Lichtes ist lange Zeit zu Gunsten der Emissionstheorie und gegen die Wellentheorie angeführt worden. Wenn das Licht in den Schwingungen eines elastischen Mediums bestände, sagte man, so müsste es sich von jedem neuen Mittelpunkte nach allen Richtungen fortpflanzen, und sich so um dazwischen gestellte hindernde Gegenstände herumbeugen. Es müssten also leuchtende Körper sichtbar sein, selbst wenn sich eine undurchdringliche Masse zwischen ihnen und dem Auge befände,

1) Zach Ephemeriden. IV. 1.

gerade so wie man tönende Körper vernimmt, wenn sie auch ein dichter Körper von dem Ohre trennt. Dieser Einwurf, welcher zuerst von NEWTON [1]) aufgefasst wurde, ist genügend beantwortet worden. Das Phänomen der Diffraktion, und besonders die inneren Farbenfranzen im Schatten schmaler und dunkler Körper beweisen, dass sich das Licht um hindernde Massen herumbeugt, und bemerkbar vom geradlinigen Laufe abweicht. Wenn der hindernde Gegenstand von bedeutenden Dimensionen ist, so nimmt die Intensität des Lichtes sehr schnell vom Rande des geometrischen Schattens nach innen zu ab, so dass es in einer sehr geringen Entfernung von jenem Rande nicht weiter wahrnehmbar ist. Aber die Dunkelheit rührt nicht von der Abwesenheit der Lichtwellen her, sondern von der gegenseitigen Zerstörung derer, welche sich dorthin verbreiten. Es ist nämlich, wenn die Oberfläche der Welle in dem Augenblicke, wo sie den Körper erreicht, in irgend eine Anzahl kleiner Theile getheilt wird, die Bewegung des Aethers an irgend einem Punkte hinter demselben, nach HUYGENS' Princip, die Summe aller Bewegungen, welche dort durch die verschiedenen Theile hervorgebracht werden, wenn man sie als verschiedene Störungsmittelpunkte betrachtet; und man kann leicht zeigen, dass wenn die Entfernung des besagten Punktes vom hindernden Körper ein bedeutendes Vielfaches der Länge einer Welle ist, die Grösse dieser Resultante innerhalb des Schattens rasch abnehmen muss, und dass das Licht nicht mehr wahrzunehmen ist, wenn die von jenem Punkte nach dem Rande des Schirmes gezogene Linie unter einem kleinen Winkel gegen die auf die Vorderseite der Welle Senkrechte geneigt ist. Die genaue Berechnung der Intensität in diesem und anderen ähnlichen Fällen hat FRESNEL mit Hülfe der Lehre von der Interfe-

---

1) *Optice Quaes.* 28.

renz ausgeführt, und gefunden, dass das Resultat auf das Vollkommenste mit der Beobachtung übereinstimmt [1]).

Dieselben Principien passen für die Luftwellen, welche den Ton bilden, und diese müssen auch ähnliche Phänomene zeigen. Aber das Verhältniss der Wellen ist unendlich verschieden. Die Länge einer Luftwelle ist mehr als 1000 Mal grösser, als die einer Aetherundulation, und die Entfernung des Ohres von dem Körper müsste in demselben Verhältniss vergrössert werden, wenn dieselben Schlussfolgen für beide Fälle anwendbar sein sollten.

Hiernach ist also die gradlinige Fortpflanzung der Lichtstrahlen eine Folgerung des Principes der Interferenz, verbunden mit HUYGENS' Lehre. Eine sehr verschiedene Ansicht des Gegenstandes ist indess von POISSON gegeben worden, in einem Memoire über die Fortpflanzung der Bewegung in elastischen Flüssigkeiten, gelesen vor der Französischen Akademie im Jahre 1823 [2]). Da er annimmt, die Elasticität des Fluidums sei dieselbe nach allen Richtungen, so wird auch die Geschwindigkeit der Fortpflanzung dieselbe sein, und folglich werden die Wellen eine Kugelgestalt haben. Die absoluten Geschwindigkeiten der Molekeln selbst werden jedoch sehr verschieden sein. POISSON findet, dass wenn die erste Störung nur nach einer Richtung stattfindet, die Geschwindigkeit der Molekeln nach allen Richtungen, welche gegen diese unter endlichen Winkeln geneigt sind, unendlich klein sein wird, so dass die Bewegung nur nach dieser Richtung bemerkbar fortgepflanzt würde. Diese Abnahme der Intensität, findet er, wird um so grösser sein, je grösser die Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist, und er schliesst, nur auf diese Art können wir die gradlinige Bewegung des Lichtes nach der Wellentheorie erklären. FRESNEL hat jedoch gezeigt, dass diesem Schluss das ge-

---

1) *„Mémoire sur la diffraction" Mémoires de l'Institut, tom. X.* (POGGEND. Ann. XXX, p. 100.)

2) *Annales de Chimie, tom. XXII.*

wöhnliche Phänomen der Diffraktion oder Beugung widerspricht, und er hat theoretische Gründe beigebracht, welche er aus dem Principe der Coexistenz kleiner Bewegungen zog, um zu beweisen, dass er bei Flüssigkeiten keinerlei Art behauptet werden könne, sondern dass die Molekeln in allen Fällen auf merkliche Weise gestört werden, und zwar in Richtungen, welche sehr bedeutend von denen der anfänglichen Vibrationen abweichen [1]).

Die Lehre von der Uebereinanderlage kleiner Bewegungen, zu der man sich mehr als ein Mal hingeneigt hat, ist eine unmittelbare Folge aus der Linearität der ursprünglichen Gleichung mit partiellen Differentialen, welche das Schwingungsgesetz eines Aethertheilchens bestimmt. Das vollständige Integral dieser Gleichung wird im Allgemeinen einen Ausdruck für alle verschiedenen ersten Störungen enthalten, und die ganze Störung wird die Summe aller partiellen Störungen sein, welche durch jede der Ursachen hervorgebracht wird, wenn sie für sich wirkt. Die partiellen Störungen indess können vereinigt oder entgegengesetzt wirken, so dass in einem Falle, wo z. B. zwei Störungen stattfinden, die Wirkung der zweiten entweder darin bestehen kann, dass sie die erste verstärkt, oder sie vermindert, und die absolute Geschwindigkeit der Aethermolekeln kann beschleunigt oder verzögert, oder durch die Vereinigung beider sogar aufgehoben werden. Denn, wenn man annähme, die Form der Function, welche die Wellenstörung ausdrückt, sei die, welche das Schwingungsgesetz des Cycloiden-Pendels darstellt, so wird die Summe der beiden coexistirenden Störungen eine einzige Störung von derselben Form sein, vorausgesetzt, die zusammensetzenden Schwingungen hätten dieselbe Länge: und die Wirkung zweier solcher coexistirenden Undulationen wird eine einzige Undulation von derselben Länge sein, welche nur in der Lage und der Weite des Raumes der grössten Schwingung von jeder der Com-

1) *Annales de Chimie, tom. XXIII.*

ponenten verschieden ist. Die Grösse der resultirenden Schwingungen kann die Summe der Differenz von denen der zusammensetzenden Schwingungen sein, oder sie kann irgend einen zwischen diesen Grenzen liegenden Werth haben. Wenn die zusammensetzenden Schwingungen gleich sind, so kann die resultirende sogar ganz verschwinden, und zwei Lichter von gleicher Intensität werden verbunden Dunkelheit erzeugen, vorausgesetzt, dass das Intervall der Verzögerung der einen Welle gegen die andere ein ungrades Multiplum der halben Wellenlänge ist.

Diese wichtige Folgerung aus der Wellentheorie, nämlich die Lehre von der Interferenz der Lichtstrahlen, wurde zuerst von Dr. THOMAS YOUNG ausgesprochen und aufgestellt, obwohl einige der Thatsachen, durch welche ihre Wahrheit sich auf experimentellem Wege bestätigt, bereits GRIMALDI bekannt waren [1]). Die Berechnung der Intensität des resultirenden Lichtes für jede relative Lage der interferirenden Wellen verdanken wir FRESNEL, und sie ist von JOHN HERSCHEL in seinem werthvollen Werke „vom Lichte" weiter ausgeführt und entwickelt worden. Wenn ein Strahl homogenen Lichtes durch zwei schmale Oeffnungen in einem Kartenblatte oder einer Metallplatte fällt, so wird das Licht von einer jeden wie von einem neuen Mittelpunkte divergiren. Wenn beide Oeffnungen dicht aneinander gebracht, und die herausfahrenden Bündel auf einer reflektirenden Fläche aufgefangen werden, so bemerkt man eine Reihe von graden, parallelen Streifen, senkrecht gegen die Verbindungslinie beider Oeffnungen, und getrennt durch völlig dunkle Zwischenräume. Dass diese wechselnden Streifen von Licht und Dunkelheit durch die gegenseitige Einwirkung der beiden Bündel hervorgebracht werden, bewies

1) Dieser geistreiche Forscher sagt sogar ausdrücklich, dass ein erhellter Körper durch neues Hinzufügen von Licht verdunkelt werden könne, und führt zum Beweise einen einfachen Versuch an. *Physico-Mathesis de Lumine, Bologna*, 1665.

Young durch die Thatsache, dass wenn einer der Strahlen aufgefangen wird, das ganze System von Franzen auf der Stelle verschwindet, und die dunklen Zwischenräume ihre frühere Helligkeit wieder erlangen.

Fresnel's Versuch ist noch befriedigender. Bei diesem wichtigen und lehrreichen Versuche, ist das Faktum der Interferenz über allen Zweifel erhoben. Die beiden Bündel gehen von einer gemeinsamen Quelle aus, und werden ganz einfach durch Reflexion von ebnen Flächen getrennt, ohne dass irgend ein Umstand obwalte, von dem man möglicherweise annehmen könne, er sei von Einfluss auf das Resultat. Das Phänomen ist also frei von allem Unwesentlichen, und es wird unmöglich, über seine Natur in Zweifel zu sein. Aber die Uebereinstimmung der Theorie mit dem Experimente zeigt sich nicht nur in den allgemeinen Zügen des Phänomens, sondern selbst in seinen kleinsten Details. Die Entfernungen der Punkte eines jeden Streifen müssten nach der Theorie von den beiden Brennpunkten der reflektirten Strahlen um eine constante Grösse entfernt sein, welche Constante ein ungrades Multiplum der halben Wellenlänge für die dunkeln Streifen, und ein grades Multiplum derselben Grösse für die hellen sein müsste. Daher müssen die Franzen Stücke von Hyperbeln sein, deren Brennpunkte die Brennpunkte der reflektirten Bündel sind; und die genauesten Messungen haben gezeigt, dass dem so ist. Die so eben erwähnten constanten Differenzen sind viel zu gering, als dass sie direkt gemessen werden könnten; aber sie können mit grosser Genauigkeit berechnet werden, wenn die Entfernungen der aufeinanderfolgenden Streifen von dem mittelsten bekannt sind. Die letzteren Entfernungen sind von Fresnel mit der höchsten Genauigkeit durch Mikrometermessungen bestimmt worden, und die Wellenlängen einer jeden Art einfachen Lichtes, welche danach berechnet sind, stimmen auf das Genügenste mit den Werthen derselben Grössen überein, wie sie sich aus der Beobachtung der Newton'schen Farbenringe ergeben.

Der

Der mittlere Streif entsteht in denjenigen Punkten, bei welchen die beiden Strahlenbündel, wenn sie dort ankommen, gleiche Wege durchlaufen haben, und da seine Lage also unabhängig von der Länge einer Welle ist, so werden die Strahlen aller Farben dort vereinigt sein, und der Streif selbst wird weiss oder farblos erscheinen. Das ist das Faktum, wie es FRESNEL selbst und die meisten Beobachter, welche den Versuch wiederholt haben, beschreiben. POTTER indess behauptet als Resultat seiner Beobachtungen, dass der mittlere Streif sowohl schwarz als auch weiss gesehen werden könne, obgleich das erstere häufiger der Fall sei, und er setzt dies Faktum der Wellentheorie entgegen [1]). Aber es scheint voreilig, aus solchen Versuchen irgend einen Schluss zu ziehen, bevor die Umstände, welche die Abweichung in den Resultaten verursachten, vollständig erforscht und verstanden sind.

Die Interferenz der Lichtstrahlen ist seit FRESNEL's entscheidendem Versuche, von allen Seiten angenommen worden, und die Phänomene, welche vordem nach der NEWTON'schen Hypothese der Anwandlungen leichteren Durchgangs und leichterer Zurückwerfung erklärt wurden, sind jetzt von den meisten Anhängern der NEWTON'schen Theorie, auf dieses einfachere und fruchtbarere Princip zurückgeführt. Dieses Princip ist, wie wir sagten, eine unmittelbare und nothwendige Folge der Wellentheorie, und seine experimentelle Begründung muss als ein wichtiger Beweisgrund für jene Theorie angesehen werden. Es bleibt uns nun noch die Frage übrig, ob irgend eine Erklärung derselben nach der Emissionstheorie gegeben werden könne.

Man kann nicht annehmen, dass die Lichtmolekeln irgend einen gegenseitigen Einfluss auf einander ausüben, denn die regelmässigen Gesetze der Reflexion und Refraktion berechtigen uns, sie als unabhängig und ein jedes für

---

1) *Phil. Mag. (3rd. Series) Vol. II. p.* 280. (POGGEND. Ann. XXIX. p. 322.

sich als Träger jener Kräfte zu betrachten, aus welchen nach der Emissionstheorie diese Gesetze abgeleitet werden. Das Phänomen der Interferenz kann indess scheinbar durch die Schwingungen der Sehnerven erklärt werden, welche durch den Impuls der Lichtstrahlen gegen die Retina hervorgebracht werden, und durch das Uebereinstimmen oder Nichtübereinstimmen dieser Schwingungen, wenn sie durch zwei interferirende Lichtbündel erregt sind. Bei dieser Annahme, welche von Young selbst aufgestellt wurde, wird die Intensität des Lichtes von dem Verhältniss der Schwingungszeit des Sehnerven, und dem Intervall der Impulse der aufeinanderfolgenden Partikel abhängen. Wenn dies Intervall gleich der Schwingungszeit wäre, oder gleich irgend einem Vielfachen derselben, so wird der zweite Impuls durch seine Wirkung die des ersten verstärken, und die Bewegung wird beschleunigt sein. Sie wird auf der andern Seite zerstört werden, wenn der zweite Impuls dem ersten nach einem Intervall gleich der Hälfte dieser Zeit folgte.

Wir haben hier angenommen, dass die ausgeschickten Theilchen in gleichen Zwischenräumen auf einander folgen, wie es der Fall sein wird, wenn ihre Emission (wie Newton es annahm) einer schwingenden Bewegung der Theilchen des leuchtenden Körpers zugeschrieben wird. Aber wir müssen annehmen, dass die Intervalle der Emission sich mit der Natur der Theilchen bei dem Lichte verschiedener Farben ändern, oder dass alle rothmachenden Theilchen (um einen Ausdruck Newton's zu gebrauchen) in einem gewissen Intervall ausgesandt werden, alle blaumachenden in einem andern, und so für jede verschiedene Art von einfachem Lichte. Daher müssten die Schwingungen der Theilchen des leuchtenden Körpers von verschiedenen Perioden für das Licht verschiedener Farben sein. Dies ist in der That ein Theil der Wellentheorie, und zwar ein nothwendiger; aber er steht in durchaus keinem Zusammenhange mit den Principien der zweiten Theorie.

II. Reflexion und Refraktion des Lichtes.

Zur Erklärung der Phänomene der Reflexion und Refraktion hat man in der NEWTON'schen Theorie angenommen, die Theilchen der Körper und des Lichtes übten eine gegenseitige Wirkung auf einander aus; diese Wirkung bestände, wenn sie fast mit einander in Berührung seien, in einer Anziehung; sie werde bei etwas grösserer Entfernung eine Abstossung, und diese anziehenden und abstossenden Kräfte wirkten wahrscheinlich immer abwechselnd nach einander. Die absoluten Werthe oder Intensitäten dieser Kräfte seien verschieden in verschiedenen Körpern; aber das Gesetz oder die Funktion der Entfernung, durch welche sie ausgedrückt werden, hat man angenommen, sei für alle ein und dasselbe [1]). Aus diesen Postulaten hat NEWTON die Gesetze der Reflexion und Refraktion streng hergeleitet. Dies Problem war das erste, bei welchem die Wirkungen jener wichtigen Klasse von Kräften, welche nur auf unmerkliche Entfernungen wirken, dem Calcül unterworfen wurden, und POISSON betrachtet die Lösung desselben als einen Abschnitt in der Geschichte dieser Wissenschaft.

Die Reflexion des Lichtes an der äussern Fläche dichter Mittel wird der abstossenden Kraft zugeschrieben; die Refraktion und die innere Reflexion jener inneren anziehenden Kraft, welche ihren Einfluss geltend macht, bis eine wirkliche Berührung statt findet. Der äusserste Wirkungskreis eines jeden Körpers ist nach dieser Hypothese nothwendig anziehend, ebenso wie der innerste; denn wenn dem nicht so wäre, so könnte im äussersten Incidenzfall kein Strahl in das Medium eindringen oder heraustreten. BREWSTER hat von diesem Grundsatze eine geistreiche Anwendung zur Erklärung des merkwürdigen, von BOUGUER angeführten

1) Diese Annahme machte NEWTON stillschweigend, als er die Funktion $\frac{\mu^2-1}{s}$ als Maass des Brechungsvermögens annahm. Siehe HERSCHEL „Vom Licht."

Faktums gemacht, dass Wasser bei grossen Einfallswinkeln ein stärkeres Reflexionsvermögen hat, als Glas.

Aber obgleich die Emissionstheorie zur Erklärung der Gesetze der Reflexion und Refraktion, beide als verschiedene Erscheinungen betrachtet, vollkommen zureichend ist, so so ist sie das doch keinesweges zur Erklärung ihres Zusammenhanges und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit. Wenn ein Lichtstrahl auf die Oberfläche irgend eines durchsichtigen Mediums fällt, so wird in jedem Falle ein Theil hindurchgelassen, und ein Theil reflektirt. Die Intensität der Reflexion ist im Allgemeinen um so geringer, je geringer der Unterschied der Brechungsindices der beiden Media ist, und dennoch stehen die reflectiven und refraktiven Kräfte (wenn diese die Ursache des Phänomens sind), in allen Medien im Verhältniss zu einander, so dass die einen mit den andern wachsen oder abnehmen [1]). Aber wie geht es zu, dass einige dieser Molekeln dem Einfluss der Abstossung folgen und reflektirt werden, während andere der Anziehung nachgeben nnd gebrochen werden? Das zu erklären, sah sich Newton genöthigt, eine neue Hypothese zu Hülfe zu nehmen. Er nahm an, die Lichtmolekeln träten in periodische Zustände, welche er „Anwandlungen des leichteren Durchgangs und der leichteren Zurückwerfung" nannte, welche die Wirkungen der anziehenden und abstossenden Kräfte modificiren, und in welchen sie geneigt sind, abwechselnd den einen oder den andern nachzugeben. Die jedesmalige Bestimmung des Partikelchens wird theils von der Phase der Anwandlung, theils von der Schiefe, unter welcher es auf die begränzende Fläche trifft, abhängen. Nun nahm er an, die Molekeln, aus denen ein Lichtstrahl besteht, befänden sich in jeder

---

1) Der Leser findet viel Neues und Interessantes, das hiermit zusammenhängt in einem Aufsatze von Brewster „*On the Reflexion and Decomposition of Light at the separating surface of media of the same and of different refracting powers.*" *Phil. Trans.* 1829. (Poggend. Ann. XVII. p. 29).

möglichen Phase ihrer Anwandlungen, wenn sie die Fläche erreichen: folglich werden einige derselben reflektirt, und andere gebrochen werden, und das Verhältniss jener zu diesen wird vom Einfallswinkel abhängig sein.

Was die Anwandlungen selbst anbetrifft, so glaubte Newton, sie auf eine schwingende Bewegung im Aether zurückführen zu müssen, welche durch die Strahlen selbst erregt wird, grade wie ein in Wasser geworfener Stein an der Oberfläche Wellen hervorbringt. Diese schwingende Bewegung pflanzt sich nach seiner Annahme schneller, als das Licht selbst fort, kommt so den Molekeln zuvor, und ruft in ihnen nun die erwähnte Neigung hervor, die fortschreitende Bewegung zu unterstützen, oder sich ihr entgegenzusetzen. In einer seiner Fragen hat Newton sogar das Minimum der Elasticität des Aethers, im Vergleich zu der der Luft, berechnet, um zu beweisen, dass wirklich eine so grosse Geschwindigkeit der Fortpflanzung statt finde[1]). Melville's und Biot's Hypothese ist mehr im Sinne der Emissionstheorie. Die Lichtmolekel haben naeh dieser Hypothese eine drehende Bewegung um ihre Schwerpunkte, welche während der fortschreitenden Bewegung fortdauert, und vermöge welcher sie während ihres Fortschreitens im Raum abwechselnd einander anziehende und abstossende Pole darbieten[2]). Boscovich stellte sich eine schwingende Bewegung in den Theilen des Strahles selbst vor, welche er im Moment der Emission empfängt, und später behält[3]).

Die Theorie der Anwandlungen hat jetzt sehr an Ansehen verloren, seitdem die Phänomene der Farben dünner Blättchen, Phänomene, welche zuerst Newton zu derselben veranlassten, als unvereinbar mit ihr dargelegt wurden. Die Erklärung, welche er von den Thatsachen, die wir jetzt betrachten, giebt, hat nach Young und Fresnel mit regel-

1) *Optice Quaes.* 21.
2) *Phil. Trans.* 1753. *Traité de Physique IV. p.* 245.
3) *Philosophiae naturalis Theoria.*

mässiger Brechung keinen Zusammenhang. In der That sind die Molekeln, welche hindurchgehen, nicht alle im Maximum der Anwandlung des Durchganges, sondern man nimmt an, sie erreichten die Oberfläche in davon sehr verschiedenen Phasen, was wir die positive Anwandlung nennen wollen. Da nun ein Wechsel der Anwandlung von positiv zu negativ im Allgemeinen hinreicht, um die Wirkung der Anziehungskraft gänzlich zu vernichten, und das Molekel dem Einfluss der abstossenden zu unterwerfen, so ist es klar, dass die Phase der Anwandlung die Wirkungen dieser Kräfte in jedem dazwischenliegenden Grade abändern muss, und dass die Molekeln, welche der Anziehungskraft gehorchen, ihre Geschwindigkeiten in verschiedenem Grade beschleunigen müssen, was nur von der Phase abhängt. Da nun die Richtung des gebrochenen Strahles von seiner Geschwindigkeit abhängt, so wird folglich der hindurchgegangene Strahl aus einzelnen Strahlen bestehen, welche unter sehr versehiedenen Winkeln gebrochen sind, und er wird zerstreut werden und unregelmässig sein.

In einigen seiner Schriften schreibt Newton die Reflexion und Refraktion des Lichtes einer Differenz in der Dichtigkeit des Aethers innerhalb und ausserhalb der Körper zu, oder vielmehr er führt die anziehenden und abstossenden Kräfte darauf, als auf ein allgemeineres Princip zurück. Er nahm an, der Aether sei innerhalb dichter Körper dünner, als ausserhalb, und die Lichtstrahlen würden, indem sie durch die feste Fläche dringen, von der Seite des dichteren Aethers fortgetrieben, so dass ihre Bewegung beschleunigt wird, wenn sie aus dem dünneren in den dichteren Körper übergehn, und verzögert im entgegengesetzten Falle. Reflexion an der Oberfläche des dünneren Mediums wird durch dieselben Annahmen erklärt; aber für die Erklärung der gewöhnlichen Reflexion von einem dichteren Medium war Newton genöthigt, neue und willkürliche Hypothesen über die Beschaffenheit des Aethers an den Gren-

zen zweier Media, in welchen seine Dichtigkeit verschieden ist, anzunehmen [1]).

Die Schnelligkeit der Fortpflanzung hängt nach der Wellentheorie einzig und allein von der Elasticität des schwingenden Mediums, im Vergleich zu seiner Dichtigkeit ab. Wenn nun eine ebene Welle schief gegen die Grenzfläche zweier Media trifft, so ist es klar, dass ihre verschiedenen Theile diese Fläche in verschiedenen Zeitmomenten erreichen werden, und jeder dieser Theile wird das Centrum zweier kugelförmigen Wellen werden, von denen eine im ersten Mittel mit der anfänglichen Geschwindigkeit fortschreitet, während die andre im neuen Medium weiter gehen wird, und zwar mit der Geschwindigkeit, welche sie gerade hat. Aber nach dem Princip der Coexistenz kleiner Bewegungen ist die Bewegung eines jeden Theilchens des ätherischen Mediums die Summe aller der Bewegungen, welche sich in demselben Augenblicke von diesen verschiedenen Störungsmittelpunkten dorthin verbreiten, und die Flächen in welchen sie sich in irgend einem Augenblick anhäufen, werden die gebrochenen und reflektirten Wellen sein. Diese Flächen haben die Eigenschaft, dass sie in irgend einem Augenblick alle kleinen sphärischen Wellen berühren. Es ist leicht einzusehen, dass sie beide eben sind, und dass die reflektirte Welle gegen die Fläche geneigt ist, während der Sinus des Neigungswinkels der gebrochenen Welle zu dem der einfallenden in dem constanten Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien steht.

Das ist die von HUYGENS gegebene Erklärung der Reflexions- nnd Refraktionsgesetze [2]). Die Bildung der grossen oder primären Welle durch Vereinigung der einzelnen sekundären oder partiellen Wellen bei dieser Erklärung, hat man das HUYGENS'sche Princip genannt, und es ist offenbar ein besonderer Fall des allgemeineren Principes der Coexi-

1) *BIRCH'S History of the Royal Society vol. III. p.* 247. *Optice Quaes.* 19.

2) *Traité de la Lumière.*

stenz kleiner Bewegungen. Es folgt leicht aus dieser Art der Bildung, dass die Oberfläche der primären Welle die äussersten Grenzen bezeichnen muss, bis zu welchen die schwingende Bewegung nach irgend einer Richtung in einer gegebenen Zeit fortgepflanzt wird, so dass das Licht nach dieser Hypothese von irgend einem Punct nach einem andern in der möglichst kleinsten Zeit fortgeht. Dies ist das allgemein bekannte FERMAT'sche Gesetz, das Gesetz der schnellsten Fortpflanzung, und es wird sich leicht zeigen, dass es von Bestand ist, wie vielen Modifikationen der Gang des Lichtes auch bei der Reflexion und Refraktion unterliegen mag, und welche Gestalt auch die elementare Welle habe.

HUYGENS' Erklärung ist von LAGRANGE [1]) in eine analytische Gestalt gebracht, aber er hat nichts zu ihrer Schärfe und Deutlichkeit hinzugefügt. Ein wichtiges Supplement zu dieser Erklärung hat jedoch FRESNEL gegeben. Aus HUYGENS' Demonstration ergab sich nicht, was aus denjenigen Theilen der sekundären Wellen werde, welche nicht zur Bildung der grossen Welle beitragen. Das Durchkreuzen derselben nach allen Richtungen musste ein schwaches, zerstreutes Licht hervorbringen, welches den ganzen Raum zwischen der grossen Welle und der reflektirenden oder brechenden Fläche ausfüllt, und wirklich nahm HUYGENS an, solches Licht existire, aber es sei zu schwach, um das Auge zu afficiren. FRESNEL hat indess gezeigt, dass alle diejenigen Theile, welche nicht zur Bildung der grossen Welle beitragen, durch Interferenz zerstört werden [2]), so dass die Bildung Einer grossen Welle durch die Vereinigung einer unendlichen Anzahl kleinerer eine genaue und entschiedene Wirkung hat.

---

1) *Sur la théorie de la lumière d' HUYGENS. Annales de Chimie, tom. XXI.*

2) *Explication de la Refraction dans la Systeme des Ondes. Ann. de Chim. tom. XXI.*

Die totale Reflexion des Lichtes an der Oberfläche eines dünneren Mediums ist von NEWTON gegen die Wellentheorie vorgebracht, und die scheinbare Schwierigkeit scheint viel dazu beigetragen zu haben, ihn zu vermögen, jene Theorie zu verwerfen. Es ist in der That nicht leicht auf den ersten Blick einzusehen, warum die Störung des Aethers innerhalb des dichteren Mediums nicht dem äusseren Aether mitgetheilt werden, und so eine Welle bis zum Auge gelangen sollte, wie gross auch die Schiefe der einfallenden Welle sein mag. Es mag genügen, darauf zu erwiedern, dass das Gesetz der Refraktion selbst in seiner ganzen Allgemeinheit eine Folgerung der Wellentheorie ist, und dass daher das Phänomen der totalen Reflexion, welches ein besonderer Fall jenes Gesetzes ist, gleichfalls erklärt ist. Aber das Princip der Interferenz lässt uns dieser Schwierigkeit direkt entgegentreten. Es lässt sich zeigen, dass die elementaren Wellen, welche sich von den verschiedenen Punkten der begrenzenden Fläche in das dünnere Medium verbreiten, einander durch Interferenz zerstören, wenn der Sinus des Einfallswinkels grösser ist, als das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien, oder wenn der Winkel selbst grösser ist, als der Grenzwinkel der totalen Reflexion[1]). Es ist hier angenommen, die Entfernung von der brechenden Fläche sei ein bedeutendes Multiplum einer Wellenlänge. Der Schluss ist nicht anwendbar auf Punkte, welche sich sehr nahe an jener Fläche befinden, und man hat Grund zu glauben, dass für solche Punkte das Gesetz der Refraktion weit verwickelter sei. Die Erfahrung lehrt uns in der That, dass Licht von dem dichteren Medium ausgehen kann, bis auf eine messbare Entfernung, wenn der Einfallswinkel grösser ist, als der Gränzwinkel totaler Reflexion. Wenn zwei Prismen, deren Basen schwach convex sind, an einander gelegt werden, und

1) Siehe FRESNEL *„Sur le système des vibrations lumineuses,“ Bibliothèque universelle, tom. XXII.*

man die Neigung dieser Basen allmälig ändert, während man durch sie hindurchsieht, so wird man bemerken, dass jenseits des Grenzwinkels das Licht in der Nähe der in Berührung stehenden Theilen noch hindurchgeht. FRESNEL mass die Breite dieses Raumes, und verglich sie mit den Durchmessern der farbigen Ringe, und fand, dass die Zwischenräume zwischen den Prismen, durch welche diese Abweichung von dem gewöhnlichen Refraktionsgesetze bewirkt wird, grösser war als eine Wellenlänge[1]). POISSONS Analysis ergiebt dasselbe Resultat, und es ist bewiesen, dass das zweite Medium in demjenigen Theile, welcher unmittelbar mit dem ersten in Berührung steht, bewegt werden wird, und dass diese Bewegung schnell abnimmt, und bei einer sehr geringen Entfernung von der Fläche nicht mehr wahrnehmbar bleibt.

Die Reflexions- und Refraktionsgesetze folgen also aus der Wellentheorie, wir mögen nun annehmen, das vibrirende Medium sei in dichten Körpern der Körper selbst, oder der Aether befinde sich in demselben, oder beides vereinigt finde Statt. EULER unterstützte die erstere dieser Meinungen, und glaubte, das Licht werde allein durch die materielleren Theilchen fortgepflanzt, auf dieselbe Weise wie der Schall. Aber dieser Hypothese widersprechen die klarsten Thatsachen, und nach ihr müsste, wie YOUNG bemerkte, die Brechung der Lichtstsahlen in unsrer Atmosphäre Millionenmal grösser sein, als sie es wirklich ist. Von den beiden andern Meinungen scheint YOUNG der letzteren angehangen und geglaubt zu haben, die Molekeln des Körpers bildeten, in Vereinigung mit denen des darin befindlichen Aethers, ein zusammengesetztes vibrirendes Medium, welches dichter als der Aether allein, aber nicht elastischer wäre. Noch andere endlich schreiben die Fortpflanzung des Lichtes durch durchsichtige Körper einzig den Schwingungen des Aethers zu, und meinen, das Fluidum werde durch die Attraktion

1) A. a. O.

des Körpers innerhalb desselben in einem Zustande grösserer Dichtigkeit als im Weltraume erhalten.

Eine sehr verschiedene Ansicht dieses Gegenstandes ist neuerlich von CHALLIS mitgetheilt. Indem dieser Mathematiker annimmt, die Dichtigkeit des Aethers sei in festen Medien dieselbe wie im freien Raume (eine Annahme, welche er wegen der Aberration für nöthig hält), glaubt er, dass die Reflexion des Lichtes sowohl, als seine Verzögerung im dichteren Medium, durch die Reflexionen, welche die Aetherwellen von den festen Theilchen des Mediums erleiden, auf welches sie bei ihrem Fortgange treffen, erklärt werden können [1]). Er zeigt in der That, dass die absoluten, den Aethertheilchen durch solche Reflexion mitgetheilten Geschwindigkeiten, in zwei Theile zerlegt werden können, von denen der eine gleichförmig fortgepflanzt wird, und von einem Wechsel der Dichtigkeit begleitet ist, während der andere augenblicklich, ohne veränderte Dichtigkeit, fortgepflanzt wird [2]). Der erstere derselben, glaubt er, wird die Reflexion des Lichtes, der zweite die verringerte Geschwindigkeit des Durchganges erklären [3]). Diese geistreiche Theorie hat den Vortheil, die Geschwindigkeit der Fortpflanzung

1) Diese Art und Weise, die Reflexion des Lichtes nach der Wellentheorie zu erklären, ist die, welche FRESNEL ursprünglich festhielt, und in einem vor der franz. Akademie 1829 gelesenen Memoire darlegte.

2) *Phil. Mag., New Series, vol XI.*

3) Die mittlere Wirkung dieser Reflexionen ist, wie CHALLIS zeigt, gleichwerthig der einer retardirenden Kraft, und durch eine gewisse Annahme ihres Werthes ist er zu folgender einfachen Formel für die Bestimmung des Verhältnisses der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im freien Raume und im Medium gelangt

$$\mu^2 - 1 = \mu \delta H,$$

wo δ die Dichtigkeit des Mediums, und H eine Constante, proportional der mittleren verzögernden Wirkung einer gegebenen Anzahl von Molekeln bezeichnet. Für die Gase ist dann die Grösse $\frac{\mu^2 - 1}{\delta}$ fast constant, wie gross der Druck auch sein mag. Dies Resultat folgt sehr einfach aus der Emissionstheorie, und ist experimentell von BIOT und ARAGO nachgewiesen. *Phil. Mag. New Series, v. VII.*

in dichten Körpern direkt mit deren sonstigen Beschaffenheit zu verbinden, und so in dem Process der physikalischen Induktion einen Schritt weiter zu gehen. Auf der andern Seite nöthigt sie uns anzunehmen, dass die Theilchen des Aethers und die dichter Körper keine gegenseitige Einwirkung irgend einer Art auf einander ausüben. Wir kennen den Aether oder seine Eigenschaften zu wenig, um das zu läugnen, nur weil es durch keine der bisher enthüllten Eigenschaften der Materie unterstützt wird; aber man muss zu gleicher Zeit annehmen, dass die Verletzung solcher Analogien einen Grund von einigem Gewicht gegen die Theorie abgiebt, welche das nöthig macht.

Welche Annahme wir auch über die Beschaffenheit der Körper oder des Aethers innerhalb derselben in der Wellentheorie machen mögen, so muss sie doch stets so beschaffen sein, dass die Geschwindigkeit der Fortpflanzung geringer ist in dem dichteren Medium. Bei der Emissionstheorie auf der andern Seite findet das umgekehrte statt, so dass sie auf entgegengesetztem Wege doch zu demselben Resultate führt. Hier sind nun beide Theorien über eine Thatsache im Kampf, und wir haben uns nur über diese Thatsache ins Klare zu setzen, um im Stande zu sein über sie zu entscheiden. Dies schien durch YOUNG's Räsonnement geschehen. Aus den Gesetzen der Interferenz ergiebt sich, dass homogenes Licht bei seinem Fortschreiten im Raume gewisse periodisch wiederkehrende Zustände durchläuft, deren Intervalle in ein und demselben Medium constant sind, während sie sich in verschiedenen Medien wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten, da man nicht annehmen kann, die Anzahl solcher Intervalle ändere sich in einer gegebenen Menge Licht. Nun folgte aus NEWTON's Versuchen, dass die Intervalle, mit deren Hülfe er die Phänome dünner Platten erklärte, im dichteren Medium verringert würden, und da YOUNG gezeigt hat, dass diese Intervalle mit denen aus dem Interferenzgesetze hergeleiteten identisch sind, so folgte, dass die Geschwindig-

keit des Lichtes im dichteren Medium geringer ist[1]). Newton fand sogar, dass das Verhältniss der Grössen der Intervalle dasselbe sei, wie das der Einfalls- und Brechungssinus, und das muss nach den Principien der Wellentheorie genau der Fall sein.

Aber die Verzögerung des Lichtes im dichteren Medium ist von Arago direkt gezeigt worden. Wenn man zwei Bündel interferiren und Franzen hervorbringen lässt, wie bei Fresnel's Versuch, und man eine dünne Platte eines dichteren Mediums in die Bahn des einen derselben einschiebt, so wird das ganze Franzensystem nach der einen oder der andern Seite geschoben werden, je nachdem das Licht innerhalb der Platte beschleunigt oder verzögert wurde. Das Resultat dieses wichtigen und entscheidenden Versuches sprach für die Wellentheorie[2]).

Da der Brechungsindex gleich dem geraden oder umgekehrten Verhältniss der Geschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien ist, so folgt, wir mögen eine Theorie annehmen, welche wir wollen, dass irgend eine Aenderung der Geschwindigkeit des einfallenden Strahles eine Veränderung in der Grösse der Brechung verursachen muss, wenn nicht die Geschwindigkeit des gebrochenen Strahles verhältnissmässig mit verändert würde. Nun wird die relative Geschwindigkeit des Lichtes eines Sternes durch die Bewegung der Erde geändert, und die Grösse der Aenderung ist offenbar derjenige Theil der Geschwindigkeit der Erde, welcher wenn man diese zerlegt, in die Richtung des Sternes fällt. Es war daher eine Sache vom höchsten Interesse, zu bestimmen, wie und in welchem Grade diese Aenderung auf die Refraktion Einfluss hat. Durch die Beobachtung die-

---

1) *„Experiments and Calculations relative to Physical Optics."* *Phil. Trans.* 1803.

2) *Annales de Chimie, tom.* 1. Siehe ferner Potter's Bericht über die Wiederholung dieses Versuches. *Phil. Mag. vol. III. pag.* 333.

ser Wirkung hoffte man im Besitz einer leichten und sichern Methode der Bestimmung der Constanten der Aberration zu sein, das Licht verschiedener Sterne vergleichen zu können, einen Unterschied in der Geschwindigkeit desselben zu entdecken, und endlich diese Geschwindigkeiten mit der des Lichtes, welches von andern Quellen herkommt, vergleichen zu können. Der Versuch wurde durch Anregung von Seiten La place's von Arago unternommen [1]). Ein achromatisches Prisma wurde vor dem Objectivglase des Teleskopes eines Repetitionskreises befestigt, so dass es nur einen Theil der Linse verdeckte. Wenn nun der Stern direkt durch den unbedeckten Theil der Linse, und nacher in der Richtung beobachtet wurde, in welcher sein Licht durch das Prisma abgelenkt wurde, so gab die Differenz der abgelesenen Winkel die Abweichung. Die für die Beobachtung ausgewählten Sterne waren die in der Ekliptik, welche fast um 6 Uhr Morgens und 6 Uhr Abends durch den Meridian gingen, und die Geschwindigkeit der Erde wurde im ersteren Falle zu der des Sternes hinzugenommen und im letzteren davon abgezogen. Man bemerkte durchaus keine Differenz in den Abweichungen, und das Resultat war dasselbe, aus welcher Quelle das Licht gekommen sein mochte [2]). Fraunhofer hat ebenfalls das Licht mehrerer Fixsterne hinsichtlich seiner Brechbarkeit verglichen. Es war durchaus kein Unterschied bemerkbar, obgleich man, mit Hülfe der angewandten Methode, eine Dif-

---

1) Michell scheint zuerst daran gedacht zu haben, eine Differenz in der Geschwindigkeit des Lichtes der Fixsterne durch ihre Wirkung auf die Grösse der Refraktion zu entdecken. Er glaubte, solch eine Differenz der Geschwindigkeit müsse nothwendig durch die verschiedene Anziehung der Sterne gegen die ausgesandten Molekeln statt finden, und er hat die von dieser Ursache herrührende Verminderung der ursprünglichen Emissionsgeschwindigkeit berechnet. *Phil. trans.* 1784.

2) *Biot, Astronomie Physique, vol. III.*

ferenz von fast $\frac{1}{10000}$ der ganzen Brechung hätte entdekken können [1]).

Dieses merkwürdige und unerwartete Resultat kann, wie Arago bemerkte, nur durch die bereits erwähnte Hypothese mit der Emissionstheorie vereinigt werden [2]), dass die Molekeln mit verschiedenen Geschwindigkeiten von dem leuchtendem Körper ausgesandt werden, aber dass es unter diesen Geschwindigkeiten nur eine giebt, welche unsern Gesichtsorganen angemessen ist, und die Empfindung des Lichtes hervorbringt. Die Wellentheorie ist für die Erklärung erfolgreicher gewesen. Wenn der Aether, welcher unsere Erde umgiebt, wie die Luft an der Bewegung derselben Theil nähme, so würde die Refraktion genau dieselbe sein, als wenn das Ganze in Ruhe wäre. Wir haben jedoch gesehen, dass dies nicht der Fall sein kann, und das Phänomen der Aberration zwingt uns anzunehmen, dass das ätherische Medium, welches die Erde umgiebt, durch die Bewegung derselben nicht mitbewegt werde. Wenn man dies annimmt, so folgt, dass derjenige Aether, welcher durch das brechende Medium hindurchgeführt wird, die Ursache davon ist, dass seine Dichtigkeit die des umgebenden Aethers übertrifft. Nach dieser Annahme hat Fresnel die Länge einer Welle in dem sich bewegenden Medium, und daraus auch die wirkliche, durch die Erdbewegung hervorgebrachte Aenderung in der Richtung des gebrochenen Strahles berechnet [3]). Man fand, dass diese Aenderung entgegengesetzt und genau gleich der durch dieselbe Ursache in der

---

1) *Edinb. Journal of science, VIII, p.* 7.

2) *L. Prevost: „De l'effet du mouvement d'un plan refrigent sur la Refraction." Mémoires de Génève. tom. I.* Seine Schlüsse scheinen nicht folgerecht..

3) Der Sinus der Aenderung verhält sich zum Sinus der ganzen Abweichung des Strahles wie die Geschwindigkeit der Erde zu der des Lichtes. Fresnel's Resultat ist weit zusammengesetzter, aber man wird es darauf leicht zurückführen können. *„Sur l'Influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'Optique." Annales de Chimie, t. IX.*

scheinbaren Richtung des Strahles hervorgebrachten sei, so dass man den Strahl wirklich in derselben Richtung sieht, als wenn die Erde in Ruhe wäre, und die scheinbare Refraktion bleibt durch die Bewegung der Erde ungeändert. Diese Resultate sind, kann man sagen, genau dieselben für die irdischen Gegenstände, da die Geschwindigkeit der Wellenverbreitung unabhängig von der Bewegung des leuchtenden Körpers ist.

Newton glaubte, die verschiedene Brechbarkeit der Lichtstrahlen dadurch erklären zu können, dass er ganz einfach annahm, sie seien Körper von verschiedener Grösse, so dass der rothe aus den grössesten und der violette aus den kleinsten bestände. Es ist indessen klar, dass diese Annahme mit der einfachen Hypothese des Ausschleuderns, wie sie seine Nachfolger festhielten, so wenig als mit der in den *Principiis* gegebenen Erklärung des Gesetzes der Brechung in irgend einem Bezug stehen kann. Sie hängt mit jener complicirteren Theorie zusammen, nach welcher man annimmt, die Lichtmolekeln erregten die Schwingungen des Aethers in den Körpern, auf welche sie treffen.

de Courtivron uud Melville versuchten, die Lichtzerstreuung durch eine Verschiedenheit in der Anfangsgeschwindigkeit der Molekeln zu erklären, so dass das rothe Licht das schnellste und das violette das langsamste wäre. Aber wenn dies sich als die wahre Ursache des Phänomens erweisen sollte, so müsste die Zerstreuung der mittleren Refraktion proportional sein. In der That wurde die Hypothese auch fast schon wieder aufgegeben, als man sie vorschlug. Ihre Erfinder hatten vorausgesehen, dass man die Folgerung daraus ziehen würde, die Farbe des Lichtes bei den Verfinsterungen der Jupiterstrabanten kurz vor dem Verschwinden und kurz nach dem Hervortreten müsse sich ändern, und das Vorhandensein einer solchen Wirkung in dem Grade, wie es nach der Theorie [1]) hätte der Fall sein müs-

1) Die Dauer dieses Wechsels sollte sich nach Mel-

müssen, wurde durch SHORT's Beobachtungen[1]) als vollständig mit der Wahrheit im Widerspruch stehend erwiesen. Eine andere Folgerung aus einer solchen Verschiedenheit der Anfangsgeschwindigkeiten verschieden gefärbten Lichtes ist die, dass sich die Aberration der Fixsterne auch mit der Natur des Lichtes ändern, und ein jeder Stern als ein farbiges Spectrum erscheinen müsste, dessen Länge der Richtung der Erdbewegung parallel wäre.

Nach den neueren Vertheidigern der Emissionstheorie sind die Lichtmolekeln heterogen, und die auf dieselben von den Körpern ausgeübte Anziehung ändert sich mit ihrer Natur, und ist in dieser Hinsicht der chemischen Affinität analog. YOUNG bemerkte aber sehr richtig, dass diese Annahme nur unsere Unfähigkeit, eine mechanische Ursache für das Phänomen aufzufinden, verhülle.

Es ist merkwürdig, dass NEWTON selbst der erste war, welcher jenen Theil der Wellentheorie begründete, in welchem die Farbe des Lichtes durch die Häufigkeit der Aethervibrationen, oder durch die Länge einer Welle[2]) bestimmt sein soll, und das ist von allen Anhängern dieser Theorie gleichfalls angenommen. Aber die Beobachtung lehrt, dass der Brechungsindex, oder das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien verschieden ist für verschiedenfarbiges Licht. Die Anhänger der Wellentheorie sind also genöthigt den Schluss zu ziehen, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in brechenden Medien sich mit

---

VILLE bis auf 42 Sekunden belaufen, da sich die Geschwindigkeit verschieden gefärbten Lichtes umgekehrt wie die Brechungsindices verhält *(Phil. trans.* 1753.*)*. Dies Princip ist jedoch, wie CLAIRAULT *(Phil. trans.* 1754*)* gezeigt hat, offenbar unrichtig. Man kann leicht zeigen, dass sich die Anfangs-Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Grösse $\sqrt{\mu^2-1}$ ändern müsse, wenn man daraus die Zerstreuung erklären will, und dass die Dauer jenes Phänomens sogar noch grösser sein müsste, als es MELVILLE angab.

1) *Phil. trans.* 1753.

2) *Phil. trans.* 1672,

der Länge der Welle ändere. Hier nun treffen wir auf eine Schwierigkeit in dieser Theorie, welche man als das schlimmste Hinderniss angesehen hat, das ihrer Annahme entgegensteht. Der Theorie zufolge ist die Geschwindigkeit der Wellenfortpflanzung in ein und demselben Medium constant, und hängt einzig und allein von der Elasticität des Mediums, im Vergleich mit seiner Dichtigkeit ab. Diese Geschwindigkeit müsste also für Licht von jeder Farbe dieselbe sein, so wie man gefunden hat, dass es für den Schall eines jeden Tones der Fall ist.

Man hat verschiedentlich versucht, diese Schwierigkeit fortzuräumen[1]). Euler glaubte, dass die Geschwindigkeit der auf einanderfolgenden Wellen durch ihre gegenseitige Einwirkung eine Vergrösserung erlitte, und er nahm an, diese Vergrösserung ändere sich mit ihrer Länge, und zwar so, dass die längsten Wellen die geringste Beschleunigung erführen, und daher am meisten gebrochen würden[2]). Aber das Phänomen der farbigen Ringe berechtigt uns, wie Euler bemerkt, im Gegentheil zu der Annahme, dass die Längen der Wellen abnehmen, so wie die Brechbarheit zunimmt, und er scheint selbst seine erste Annahme aufgegeben zu haben.

Dr. Young erklärte die Zerstreuung durch die Annahme, dass feste Theilchen der brechenden Substanz so gut wie die Aethertheilchen innerhalb derselben vibriren, und dass die früheren Vibrationen auf die späteren Einfluss haben, und zwar verschiedenen Einfluss nach ihrer Häufig-

---

1) Es ist kaum nöthig, hier auf das von Rudberg vorgeschlagene Gesetz zu verweisen, welches die Längen einer Undulation, oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien mit einander in Zusammenhang bringen soll; denn dieses Gesetz ist rein hypothetisch, und seine scheinbare Uebereinstimmung mit der Beobachtung rührte nur von der Annahme der willkürlichen Constanten her, welche in dem Ausdruck vorkommen. — *Annales de Chimie. XXXIV. XXXVII.*

2) *Opuscula varii Argumenti, tom. I. p.* 217.

keit. CHALLIS hat diese Hypothese aufgenommen und entwickelt. Nach ihm kann man, wie bereits bemerkt, die verminderte Geschwindigkeit des Durchgangs durch ein dichteres Medium dadurch erklären, dass die Theilchen des Mediums der freien Bewegung der Aethertheilchen Widerstand leisten. Wenn man annimmt, erstere seien unbeweglich, so wird das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten im freien Raume und im Medium eine einfache Funktion der Dichtigkeit des Letzteren sein, und bei einem gegebenen Medium wird ihr Werth ein constanter, aber wenn die Theilchen des Mediums vibriren, so wird der Werth dieses Verhältnisses auch von der Länge der Welle abhängen, und sich daher mit der Farbe des Lichtes ändern [1]).

Die von AIRY gegebene Erklärung steht in genauerem Zusammenhange mit einmal angenommenen Principien. Man ist jetzt allgemein darüber einig, dass die Geschwindigkeit des Schalles zum Theil von einer Veränderung der Elasticität abhängt, welche die Luft während ihrer Vibrationen in Folge der durch Zusammendrücken frei gewordenen latenten Wärme erleidet. Wenn diese Wärme für ihre Entwickelung Zeit bedarf, so muss sich die entwickelte Menge und daher das Elasticitätsvermögen mit der Schwingungszeit ändern. Folglich müsste sich auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Zeit ändern, und für Wellen von verschiedenen Längen verschieden sein. AIRY glaubt, dass beim Licht ein ähnlicher Fall statt finde, und dass die Elasticität des Aethers in brechenden Medien folglich eine Veränderung erleiden kann, deren Grösse von der Schwingungszeit abhängt.

Die von FRESNEL gegebene Erklärung scheint von allen die einfachste und natürlichste zu sein. Das Ergebniss

---

1) *„On attempt to explain theoretically the different Refrangibility of the Rays of Light, according to the hypothese of Undulations.“ Phil. Mag. New Series, vol. VIII.*

der Analysis, dass die Geschwindigkeit der Wellenverbreitung in ein und demselben homogenen Mittel constant ist, hat man aus der Annahme gefolgert, dass der Wirkungskreis der Molekel des Mediums unendlich klein sei im Vergleich mit der Länge einer Welle. Wenn wir uns von dieser Beschränkung befreiten, so hätten wir länger keinen Grund zu schliessen, dass Wellen von verschiedenen Längen sich mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen. Fresnel sagt, er habe bewiesen, dass wenn die gegenseitige Einwirkung der Aethermolekeln sich im Vergleich mit der Länge einer Welle bis auf eine merkliche Entfernung erstreckt, die Wellen von verschiedenen Längen mit derselben Geschwindigkeit fortgepflanzt werden; und die Elasticität des Mediums und daher auch die Geschwindigkeit nähmen mit der Länge einer Welle zu [1]). Hier ist also die Beständigkeit der Wellenfortpflanzung nur als das angenäherte Resultat einer unvollkommenen Analyse betrachtet. Cauchy betrachtete das Problem aus einem ganz ähnlichen Gesichtspunkt. In den tiefen Forschungen dieses Mathematikers über das Licht wird der Aether als ein System von kleinen Theilchen angesehen, welche durch gegenseitige Anziehungen oder Abstossungen mit einander in Verbindung stehen, und aus den partiellen Differentialgleichungen, welche ihre Bewegung darstellen, leitete er die Gesetze der Fortpflanzung sowohl in krystallisirten, als in homogenen Medien ab. Diese Gleichungen waren jedoch nur angenähert, und aus anderen von grösserer Allgemeinheit hergeleitet, indem er die Ausdrücke fortliess, welche die höheren Potenzen der Ortsveränderungen und ihrer Ableitungen nach den Coordinaten enthielten. Und indem er mit Hülfe der allgemeineren Gleichungen an das Problem der Fortpflanzung einer ebenen Welle ging,

1) Auf diesen Beweis bezieht sich Fresnel mehr als einmal, als enthalten in einer Anmerkung zu seiner Abhandlung über die doppelte Brechung. Die Anmerkung ist indess, wahrscheinlich durch irgend ein Versehen, nie gedruckt worden.

bewies er schliesslich das Vorhandensein einer Beziehung zwischen der Geschwindigkeit der Fortpflanzung und der Wellenlänge [1]).

Die **Undurchsichtigkeit** der Körper schreibt NEWTON der Discontinuität ihrer Theile und der grossen Menge von Reflexionen zu, welche die Lichtstrahlen im Innern derselben erleiden [2]). Wir haben Gründe zu glauben, dass dies wirklich der Fall ist, aber dennoch sind wir weit davon entfernt, das Phänomen vollständig erklären zu können. Wenn die Zurückwerfungen und Brechungen, welche so an jeder neuen Fläche, auf welche das Licht trifft, entstehen, denen ähnlich wären, welche an der äusseren Oberfläche der Körper statt finden, so würden die Lichtmolekeln offenbar nach jeder Richtung zerstreut werden, aber ihre Geschwindigkeit würde sich durchaus nicht vermindern. Wie geht es also zu, dass sie am Ende nicht ebenso aus dem Körper heraustreten, wie sie hineintraten, und ihn so nach allen

---

1) *Mémoire sur la dispersion de la lumière.* — Die Aufmerksamkeit der mathematischen Sektion der britischen Naturforscherversammlung wurde durch Prof. POWELL auf diese Theorie gelenkt, hauptsächlich wegen einer Einschränkung, welche bei den physikalischen Hypothesen nothwendig schien (Als eine nothwendige Bedingung fügte er hinzu, was FRESNEL längst behauptet, nämlich dass die Entfernung zwischen zwei Molekeln im Vergleich mit der Wellenlänge nicht sehr klein sein müsse. *Fourth Report of the Brit. Assoc.* Später hat POWELL (*Phil. Trans.* 1835. pt. I. p 249. POGGEND. Ann. XXXVII. p. 352.) aus CAUCHY's Untersuchungen eine Formel hergeleitet für die **Lagen** der einzelnen Strahlen (d. h. also für das Brechungsverhältniss oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten) als abhängig von der Länge ihrer Wellen. Er verglich die aus den Formeln hergeleiteten Relationen mit den FRAUNHOFER'schen numerischen Werthen, und zeigte die möglichst nahe Uebereinstimmung. Für alle bis jetzt genau untersuchten Mittel giebt demnach die Undulationstheorie zugleich das Gesetz und die Erklärung der Dispersionserscheinungen. J TOVEY hat (*Phil. Mag Ser. III. vol VIII. p.* 7. POGGEND. Ann. XXXVII. p. 360.) einen Beweis der POWELL'schen Formel geliefert. A. d. Ü.)

2) *Optice Lib.* 2, *sect.* 3.

Richtungen sichtbar machen, nicht durch eine Reflexion von der Oberfläche, sondern durch eine secundäre Lichtaussendung. Das Verlöschen des Lichtes zu erklären, müssten wir in der Emissionstheorie annehmen, es verbände sich mit dem Körper, in welchen es eintritt, und die einfachste Art, auf welche wir uns vorstellen können, wie diese Vereinigung zu Stande komme, ist ein direktes Zusammentreten der Lichtmolekeln mit denen der Körper, wodurch sie in die Sphäre jener inneren anziehenden Kräfte gebracht werden, welche eine chemische Verbindung hervorgehen lassen. Das scheint NEWTON's Meinung gewesen zu sein. Er sagt: „Kann man nicht feste Körper und Licht in einander verwandeln, und können nicht Körper durch die Lichttheilchen viel von deren Wirksamkeit erhalten, wenn sie sich mit ihnen verbinden? Denn alle Körper strahlen Licht aus, wenn man sie erwärmt, so lange sie hinlänglich heiss bleiben, und Licht bleibt in den Körpern zurück, wenn die Strahlen auf die Theile derselben gefallen sind [1]."

Wenn wir von dieser einfachen Thatsache der Absorption zur Betrachtung des Gesetzes derselben, das von der Natur des Lichtes abhängen muss, fortgehen, so treffen wir bei jedem Schritte auf neue Schwierigkeiten. Die Intensität des hindurchgegangenen Lichtes, betrachtet als eine Funktion seiner Brechbarkeit, scheint keinem Gesetze, oder einem so verwickelten unterworfen zu sein, dass alle Versuche vergeblich gewesen sind, sie durch eine empirische Formel darzustellen. Die Maxima und Minima sind oft wirklich zahllos, und die Veränderliche führt nicht allmälig zu ihnen, sondern die Art, wie man sie findet, scheint eine gewaltsame Verletzung des Gesetzes der Continuität. Diese scheinbar launenhaften Aenderungen wurden schon vor langer Zeit von Dr. YOUNG beobachtet, und zwar an dem Lichte, welches durch gewöhnliches smalteblaues Glas gegangen war. DAVID BREWSTER hat sich in neuerer Zeit

1) *Optice Quaes.* 30.

mit demselben Gegenstande beschäftigt, und eine grosse Menge farbiger Körper in Bezug auf ihr Absorptionsvermögen untersucht. Er fand unter anderem, dass von den grünen Flüssigkeiten, welche man aus dem grünfärbenden Princip der Pflanzenblätter durch Extrahirung mit Alkohol erhält, eine sehr bemerkbare, entschiedene Wirkung auf die Strahlen des Spectrums ausgeübt wird, und diese Einwirkung verrchwindet nicht ganz, selbst wenn die Flüssigkeit vollkommen farblos geworden ist[1]). Das ebenfalls von Brewster beobachtete Absorptionsvermögen des salpetrigsauren Dampfes ist jedoch das merkwürdigste, das je aufgefunden. Wenn das durch dieses Gas gegangene Licht durch ein Prisma zerlegt wird, so findet man, dass etwa 2000 Theile des Lichtes zurückbleiben, und es erscheinen im Spektrum 2000 dunkle Räume, oder unzusammenhängende lichtleere Stellen. Diese nehmen an Zahl und Grösse mit der Temperatur des Gases zu, bis bei hinlänglicher Erhöhung der Temperatur dieser merkwürdige Körper vollkommen undurchsichtig wird, und nicht einen einzigen Strahl des hellsten Sonnenlichtes hindurchlässt[2]). Miller und Daniell haben bei anderen Gasen analoge Eigenschaften gefunden. Im Spektrum, welches durch Licht, das durch Brom- oder Jodgas gegangen ist, hervorgebracht wird, sind mehr als hundert dunkle Linien in gleicher Entfernung von einander sichtbar[3]).

Um die Vorliebe farbiger Mittel für gewisse Klassen von Strahlen nach der Emissionstheorie zu erklären, scheint die Annahme nothwendig, dass in einer Entfernung eine Anziehungskraft zwischen den Molekeln des Körpers

---

1) *„On the Colours of Natural Bodies.“ Edinb. Trans. vol. XII.*

2) *„On the Lines of the Solar. Spectrum“ etc. Edinb. Tr. vol. XII.* (Poggend. Ann. XXXII. p. 128 ; XXXIII. p. 233.)

3) Französische Uebersetzung von Herschel's Werk über das Licht. Supplement. p. 455. (Poggend. Ann. XXVIII. p. 386., XXXIII. p. 128.)

und denen des Lichtes ausgeübt werde, und dass die absolute Grösse dieser Kraft sich mit der Farbe ändere. Es scheint nicht leicht, diese Annahme mit der NEWTON'schen Erklärung der Refraktion zu vereinigen, und die Schwierigkeit wird noch grösser, wenn wir dieselben Betrachtungen auf die Absorption bestimmter Strahlen anzuwenden versuchen, und die Hypothese specifischer Wirkungen, welche sich auf die unzusammenhängendste und unregelmässigste Weise mit der Brechbarkeit des Strahles ändern, einführen.

Die Absorption des Lichtes und die Undurchsichtigkeit der Körper wurden schon von HALLEY als schwierig mit der Wellentheorie vereinbar angeführt. Man nimmt an, der Aether dringe frei durch alle Körper, und warum sollte das nicht auch die schwingende Bewegung thun, in welcher das Licht besteht? Für diese Schwierigkeit finden wir eine vollständige Lösung in der Lehre von der Interferenz. Wenn eine Welle in eine unzusammenhängende Substanz tritt, so wird sie zertheilt, und ihre Theile erleiden durch innere Reflexionen beständig weitere Theilungen, so dass diese, wenn sie bis zur zweiten Fläche des Körpers gelangen, sich in jeder möglichen Phase befinden, und einander durch Interferenz zerstören müssen. Das Phänomen ist, wie JOHN HERSCHEL bemerkte, analog der gehinderten Fortpflanzung des Schalles in einer Mischung von Gasen, welche in Vergleich mit ihrer Dichtigkeit sehr in ihrer Elasticität verschieden sind.

JOHN HERSCHEL hat eine sinnreiche und natürliche Erklärung der Absorption specifischer Strahlen nach den Principien der Wellentheorie gegeben [1]). Er nimmt an, die Theilchen des Körpers und die des Aethers bildeten vereinigt zusammengesetzte vibrirende Systeme, welche mehr

1) *„On the Absorption of Light by coloured Media, viewed in connexion with thu Undulatory Theory,“ Phil. Mag., third Series, vol. III.*

geeignet sind, Vibrationen von einer gewissen, bestimmten Periode hindurchzulassen, als andere. Andere Schwingungen jedoch, welche nicht mit diesen Systemen im Einklang stehen, können sich hindurch verbreiten. Diese erzwungenen Schwingungen, wie er sie nennt, werden durch den gegenseitigen Einfluss der Bewegungen der Theilchen des Systems in ihrem Fortgange aufgehalten, und ihre Amplituden werden verringert werden; er zeigt, dass es möglich ist, sich Systeme zu denken, welche für eine Vibration von einer besondern Periode vollkommen undurchdringlich sind, während sie andere frei hindurchlassen, welche in ihrer Häufigkeit nicht wesentlich von ihnen verschieden sind [1]. Aber wir müssen bemerken, dass diese wichtigen und interessanten Betrachtungen von Herschel nur in der Absicht angestellt wurden, eine eingebildete Unhaltbarkeit der Absorptionsphänomene neben den mechanischen Gesetzen vibrirender Bewegung fortzuräumen. Wir sind noch weit von einer genauen Theorie der Absorption entfernt. Wenn eine solche Theorie wird aufgestellt sein, wird man Grund haben zu glauben, dass mit ihrer Hülfe auch eine Einsicht in die innere Natur der Körper, sogar noch bestimmter, als es uns schon die Wirkungen des polarisirten Lichtes erlauben, möglich werde, und dass zugleich die Gesetze der

1) Einen interessanten Interferenzversuch, welcher in gewisser Hinsicht John Herschel's oben angeführtem ähnlich ist, wurde unlängst von Kane bekannt gemacht. Ein zusammengesetztes Rohr, dessen Stücke eine Länge von 9 und 13¼ Zoll hatten und an beiden Enden mit einander verbunden waren, liess man vermittelst der Zunge der Orgelpfeife tönen. Jede der Röhren gab für sich ihren Grundton, und alle diesem harmonische Töne, und wenn zwischen ihnen eine freie Communication hergestellt wurde, so gab das System von Röhren alle Töne dieser beiden Reihen, mit Ausnahme derjenigen, deren Wellen in völliger Discordanz standen. So wurde der Grundton der kurzen Röhre durchaus nicht hervorgebracht, während seine Oktave mit merkwürdiger Klarheit zu hören war; im ersten Fall waren beide Wellen in völliger Discordanz, und im letzteren in völliger Accordanz.

Molekular-Wirkung vielleicht einst an den Phänomenen von Licht, das durch irgend ein Mittel gegangen ist, werden erforscht werden [1]).

---

1) F. v. Wrede hat (Kongl. Vetensk. Akad. Handl. f. 1834.; Poggend. Ann. XXXII. p. 353.) versucht, die Absorptionserscheinungen, und zwar grade die durch Gasarten, welche Brewster als vorzüglich der Undulationstheorie entgegenstehend ansieht, nach den Gesetzen dieser Theorie zu erklären. Er geht dabei von der Hypothese aus, das Licht werde von den kleinsten Theilchen des Körpers theilweis reflektirt, bevor es wieder aus ihm heraustritt (eine Annahme, welche nächst Fresnel auch Challis zur Erklärung der Reflexion und der Verzögerung in dichteren Mitteln machte). Hierdurch entsteht eine unendliche Reihe von Lichtwellen-Systemen, von denen ein jedes eine schwächere Intensität hat als das nächst vorhergehende, und gegen dieses um ein, dem doppelten Abstande zwischen den reflektirenden Theilchen gleiches Stück verzögert worden ist. Von dieser Verzögerung nun, oder der Entfernung der reflektirenden Flächen von einander und ihrem Verhältniss zur Länge der Lichtwelle wird die resultirende Intensität abhängig sein, so dass, wenn diese Grösse gleich $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ der Lichtwellenlänge ist, und wir nur bei Betrachtung der beiden ersten der Lichtwellensysteme stehen bleiben, die Intensität der Resultante gleich sein muss dem Unterschiede zwischen den Intensitäten beider Systeme, und wenn sie gleich ist einem ganzen Multiplum einer Lichtwellenlänge, die Intensität der Resultante gleich sein muss der Summe der Intensitäten der Systeme. Ist nun die Verzögerung φ, so muss die Intensität aller Lichtarten, deren halbe Wellenlänge φ, $\frac{\varphi}{3}$, $\frac{\varphi}{5}$ ist, ein Minimum sein, und die, deren halbe Wellenlänge $\frac{\varphi}{2}$, $\frac{\varphi}{4}$, $\frac{\varphi}{6}$ ist, müssen das Maximum der Intensität erreichen. Trennt man sie durch ein Prisma, so müssen erstere sich als absorbirt erweisen. W. zeigt dann, dass die Resultante unzähliger Systeme unter denselben Umständen ein Maximum oder Minimum wird; dass man ferner alle Abstufungen der natürlichen Farben der Körper, und die verschiedenen Grade der Durchsichtigkeit als so entstanden vorstellen kann. Er hat künstlich durch Reflexion von einem cylinderförmig gebogenen Glimmerblättchen dieselben Absorptionserscheinungen, welche z. B. Jod- und Bromgas darbieten, hervorgebracht; die Zahl der schwarzen Striche war grösser, je dicker die Glimmerplatte,

Die Eigenschaften des Bononischen Steines, welche in so hohem Grade die Aufmerksamkeit der experimentellen Forscher des vorigen Jahrhunderts auf sich zogen, scheinen auf den ersten Blick die von der Emissionstheorie gegebene Erklärung des Absorptionsphänomenes zu begünstigen, und von der Entwicklung desjenigen Lichtes herzurühren, welches sich mit dem Körper verbunden hatte. CANTON bemerkte, dass Licht in diesen Körpern, da es sich in gebundenem Zustande befände, Monate lang bleiben könne, bis seinem Ausstrahlen durch Einwirkung von Wärme ein Ziel gesetzt wird. Aber man muss zunächst hinzusetzen, dass das schwache Licht, welches diese Masse aussendet, zu dem, welches sie nach der Annahme durch Absorption aufnehmen müsste, in einem sehr kleinen Verhältniss steht. DESSAIGNES hat bemerkt, dass die meisten dieser Substanzen Licht von ein und derselben Art aussenden, welcher Art man sie auch ausgesetzt haben mag [1]). Dasselbe hat GROTTHUSS [2]) beobachtet, so wie andere spätere Forscher, und in einigen Diamanten, welche die Eigenschaft zu phosphoresciren besassen, ist das wirksamste erregende Licht von anderer Farbe als das erregte. Diese Thatsachen scheinen mit Hülfe der Emissionstheorie unerklärlich. Die Wellentheorie dagegen macht das Phänomen leicht verständlich. Wie die Schwingungen der Luft die eines tönenden Körpers erregen, und ihm eine Bewegung mittheilen, welche noch einige Zeit fortdauert, nachdem die erregende Ursache aufgehört hat zu wirken, so muss es auch mit den Undulationen des Athers der Fall sein. Wenn

---

d. h. je grösser die Verzögerung des von der zweiten hinteren Fläche reflektirten Strahles war. Mit der Annahme von mehreren ähnlichen Verzögerungen lassen sich alle Absorptionserscheinungen erklären. A. d. Ü.

1) *Mém. Inst. tom. XI.*

2) SCHWEIGGER'S Journal, 1815. Derselbe Beobachter entdeckte das merkwürdige Faktum, dass der elektrische Strom die Eigenschaft der Phosphorescenz wiederherstellte, in Fällen, wo diese durch die Wirkung heftiger Wärme völlig zerstört schien.

der Körper mit dem auffallenden Lichte im Einklang ist, so werden die Schwingungen isochronisch fortdauern, und die durch den Körper erregten Undulationen des Aethers werden von derselben Länge sein, als die, vermittelst welcher er selbst erregt wurde. Bei andern Umständen wird die Vibrationsperiode, und folglich die Länge der Welle, geändert werden, und das erregte und erregende Licht wird nicht von ein und derselben Farbe sein. Das von CANTON beobachtete Faktum ist keinesweges so leicht erklärt. YOUNG nahm an, die Vibrationen des Körpers hörten durch Kälte plötzlich auf, und gingen von Neuem vor sich, sobald sie von diesem Zwang befreit wären, wie eine Saite, welche in irgend einem Theil ihrer Vibration auf jeder Seite der Mitte gehemmt und festgehalten würde.

Die zuerst von WOLLASTON bemerkten, und nachher von FRAUNHOFER sorgfältiger untersuchten festen Linien im Sonnenspektrum, sind unlängst von DAVID BREWSTER mit grosser Sorgfalt, und wie immer, mit grossem Erfolge untersucht worden. Dieser fand eine merkwürdige Uebereinstimmung zwischen diesen Linien und den dunklen Streifen im Spektrum des salpetrigsauren Dampfes. Ebenso studirte DAVID BREWSTER, im Zusammenhange mit dem Vorhergehenden, die absorbirenden Wirkungen der Atmosphäre der Erde. Dazu gelangte er, indem er das Sonnenspektrum untersuchte, wenn die Sonne nicht weit vom Horizonte entfernt war, und er fand, dass die meisten der auf diese Weise hervorgebrachten dunklen Streifen zu FRAUNHOFER's festen Linien gehörten, welche so durch die absorbirende Kraft der Atmosphäre erweitert und von einander entfernt wurden. In andern Fällen ergab sich ein ähnliches Resultat, und man fand, dass diejenigen Punkte des Spektrums, in welchen absorbirende Körper die kräftigsten specifischen Wirkungen ausüben, im Allgemeinen mit den fehlenden Strahlen des Sonnenlichtes zusammenfallen [1]). Dieser son-

1) „*On the Colours of Natural Bodies*," *Edinb. Trans. vol. XII.*

dierbare Zusammenhang giebt BREWSTER's Betrachtungen über diese letztere Erscheinung ein bedeutendes Gewicht[1]).

„Aus Gründen, welche ich anderweitig auseinanderzusetzen Gelegenheit nehmen werde, glaube ich, dass das unmittelbar von der Sonne ausgehende Licht von dem einen Ende des Spektrums bis zum andern fortlaufend ist, und dass die fehlenden Strahlen von den Gasarten absorbirt werden, welche während der Verbrennung, durch die das Licht hervorgebracht wird, entstehen. Aber was auch die Ursache dieser dunklen Linien sein mag, so ist es doch entschieden, dass sie, während sie als feste Punkte im Spektrum von der höchsten Wichtigkeit sind, doch das Sonnenlicht völlig untauglich zu Absorptionsversuchen machen. Wir können z. B. die Wirkung absorbirender Medien auf keinen einzigen der 590 fehlenden Strahlen untersuchen, und es ist auf keine andere Weise möglich sie zu untersuchen, als in den Spektren derjenigen künstlichen Flammen, in welchen sie alle vorhanden sind.“

„Diese Schwierigkeit ist indess vollkommen durch die Entdeckung aus dem Wege geräumt, welche ich unlängst machte, nämlich die einer gasförmigen Substanz, welche mehr als tausend dunkle Linien im Spektrum einer gewöhnlichen Flamme hervorbringt, und somit künstliches Licht zur Bestimmung optischer Daten weit werthvoller macht, als es das der Sonne ist, während es uns in den Stand setzt, die Wirkung materieller Körper auf alle fehlenden Strahlen des Sonnenlichtes zu untersuchen. Ich habe diesen Versuch jetzt erwähnt, um seine Stellung zu beiden rivalisirenden Theorien des Lichtes darzulegen. Nach der NEWTON'schen Emissionshypothese kann das Faktum so hingestellt werden: Wenn ein Strahl weissen Lichtes durch eine gewisse Dicke einer besondern Gasart hindurchgeht, so werden tausend verschiedene Theile dieses Strahles in

---

1) Ich will hier einfügen, was BREWSTER im *1st. and 2d Report of the Brit. Assoc,* pag. 320 sagt. d. U.

ihrem Wege aufgehalten, in Folge einer specifischen Wirkung, welche die materiellen Atome des Gases auf sie ausüben, eine Einwirkung, welche durch blosse Erwärmung bedeutend verstärkt wird. Eine solche specifische Affinität zwischen bestimmten Atomen und bestimmten Strahlen ist, obwohl wir die nähere Art und Weise nicht verstehen, doch sehr wohl denkbar; und wir können sie der Vorstellung noch zugänglicher machen, wenn wir die Annahme wagen wollen, dass die Lichttheilchen selbst mit den letzten Molekeln der Körper identisch sind, und dass in einem jeden sich ähnliche Atome wieder vereinigen können, sobald sie in die Sphären der gegenseitigen Anziehung gebracht werden."

„In der Sprache der Undulationstheorie kann dieselbe Thatsache auf folgende Art ausgedrückt werden. Tausend verschiedene Lichtwellen oder Strahlen von verschiedener Geschwindigkeit oder Brechbarkeit sind unfähig, Undulationen durch den Aether eines durchsichtigen Gases fortzupflanzen, während alle Wellen oder Strahlen von dazwischenliegenden Geschwindigkeiten und Brechbarkeiten frei durch dasselbe Medium hindurchgehen; d. h. eine Welle von rothem Lichte $\frac{1}{250}$ Mill. Zoll breit, und eine andere Welle desselben Lichtes, $\frac{1}{252}$ Mill. Zoll breit, können ungehindert Schwingungen durch das Gas verbreiten, während ein anderer rother Strahl, $\frac{1}{251}$ Mill. Zoll breit, Schwingungen hervorbringt, welche gänzlich von dem Medium aufgehalten werden. Es giebt bei den Phänomenen des Schalles keine Thatsache, welche dieser analog wäre, und ich kann mir keine Vorstellung von einem einfachen elastischen Medium machen, dass so durch die Theilchen des Körpers, welcher dasselbe enthält, modificirt wird, dass es eine so ausserordentliche Auswahl unter den Undulationen trifft, welche es aufhält oder hindurchlässt. Wir können zwar annehmen, der Aether sei ein zusammengesetztes Medium, aus andern Medien bestehend, deren Theilchen die letzten Atome der Materie sind, und die Undulationen desselben Aethers in durchsichtigen Körpern seien irgend wie durch die Affinität

ähnlicher Atome im Aether und im brechenden Körper afficirt [1]); aber das schiebt die Schwierigkeit nur weiter zurück, und lässt die Ueberzeugung, dass das Entstehen eines solchen Systemes fehlender Strahlen durch die Einwirkung eines gasförmigen Mediums der Undulationstheorie eine fatale Schwierigkeit entgegenstellt.“

„Aber welche Hypothese man auch wählen mag, diese Klasse von Erscheinungen zu umfassen nnd zu erklären, das Faktum, dessen ich erwähnte, bietet ein weites Feld zur Untersuchung dar. Mit Hülfe dieser Absorption durch Gase können wir mit der grössten Genauigkeit die Einwirkung der Elemente materieller Körper in all ihren verschiedenen Combinationen auf bestimmte und leicht zu erkennende Lichtstrahlen untersuchen, und vielleicht merkwürdige Analogien zwischen ihren Affinitäten und denen entdecken, welche die festen Linien im Spektrum der Sterne hervorbringen. Der Apparat indess, welcher erforderlich ist, um solche Untersuchungen mit Erfolg auszuführen, kann nicht von Einzelnen angeschafft, ja nicht einmal in gewöhnlichen Zimmern angewendet werden. Linsen von grossem Durchmesser, genaue Heliostaten und Telescope von weiter Oeffnung sind zu diesem Zwecke durchaus erforderlich; aber mit solchen Hülfsmitteln würde es leicht sein, optische Combinationen aufzustellen, durch welche die fehlenden Strahlen in den Spektren aller Fixsterne bis herab zur zehnten Grösse beobachtet werden könnten, und durch welche

---

1) Diese Annahme wird durch die merkwürdige Thatsache unterstützt, welche ich ausser Zweifel gesetzt habe, nämlich dass es in verschiedenen Theilen des Spektrums zwei oder mehr Reihen von Strahlen giebt, welche dieselbe Brechbarkeit haben, oder welche genau mit derselben Geschwindigkeit unduliren, und dennoch wird eine dieser Reihen von Strahlen durch gewisse durchsichtige Körper frei hindurchgehen, oder Undulationen in ihrem Aether erregen, während die andere Reihe absorbirt wird, oder unfähig ist, Undulationen durch den Körper fortzupflanzen.
B.

wir die Wirkungen der wirklichen Verbrennung studiren können, wodurch die Sonnen anderer Weltsysteme leuchten."

Die Beobachtung der festen Linien im Sonnenspektrum veranlasste FRAUNHOFER, die optischen Charaktere von Licht, das von andern Quellen herstammte, zu prüfen. Er gelangte so zu der interessanten Entdeckung, dass das System von Streifen in den verschiedenen Arten von Licht, welche er seiner Untersuchung unterwarf, sich mit der Lichtquelle änderte, während es der Zahl der Streifen und ihrer Beziehung zu den farbigen Räumen nach bei Licht aus derselben Quelle, wie es auch modificirt sein möchte, beständig dasselbe blieb. Im Lichte des Sirius zeigten sich drei breite Streifen, welche mit denen des Sonnenlichtes keine Aehnlichkeit haben. Das Licht des elektrischen Funkens dagegen hat, wenn man es vermittelst des Prismas zerlegt, mehrere helle Linien, von denen die im Grün merkwürdig glänzend ist. Aehnliche Erscheinungen beobachtete man am Lichte künstlicher Flammen, der Flamme einer Oellampe z. B., welche ein schön bestimmtes helles Band zwischen dem Roth und Gelb, und ein anderes nicht so ausgezeichnetes im Grün zeigt[1]). Das ist jedoch nicht überall der Fall. In der rothen Strontianflamme giebt es, nach FARADAY'S und TALBOT'S Beobachtungeu, eine Menge von einander durch dunkle Streifen getrennte rothe Strahlen, und in der Flamme des Cyangases, wenn man ihr Licht ähnlich zerlegt, findet man das Violett in drei bestimm-

---

1) Denkschriften der Akademie zu München. — v. WREDE liess das Licht von der äusseren Flamme allein auf das Prisma fallen, und sah nichts als einen Theil des orangefarbenen Striches; je näher aber der untersuchte Theil der Flamme dem Dochte war, um so schwächer war der orangefarbene Strich. Er schliesst, dass die innere Flamme Licht von allen Wellenlängen giebt, die äussere dagegen nur Licht von einer einzigen, d. h. vollkommen homogenes. (Kongl. Vetensk. Handl. f. 1834. POGGEND. Ann. XXXIII. p. 353.) A. d. U.

stimmte Theile getheilt, welche breite dunkle Zwischenräume trennen [1]).

Die Thatsache im Allgemeinen, dass in gewissen Lichtarten gewisse Klassen von Strahlen nicht vorhanden sind, ist leicht zu erklären. Wenn ein stark erwärmter Körper anfängt zu leuchten, so wird das Phänomen nach der Wellentheorie ganz einfach durch eine Zunahme in der Häufigkeit der Schwingungen erklärt. Ebenso scheint die Annahme natürlich, dass im Allgemeinen die mechanischen Kräfte, welche während des Verbrennens thätig sind, entweder die Vibrationen beschleunigen oder verzögern, und so den Charakter des ausgesendeten Lichtes ändern. Das bei schwacher oder beginnender Verbrennung ausgesendete Licht ist im Allgemeinen blau. John Herschel bemerkte, dass wenn Schwefel mit schwacher Flamme brennt, sein Licht alle Strahlen des Sonnenspektrums enthielt, und hauptsächlich die blauen und violetten, während bei lebhaftem Verbrennungsprocess diese völlig verschwinden, und das Licht ein fast vollkommen homogen gelbes ist [2]). Die Abstufungen in der Färbung einer gewöhnlichen Kerzenflamme von dem tiefen Blau des untersten Theiles (welches sich bei der Zerlegung durch das Prisma als aus fünf verschiedenen Theilen bestehend zeigt) bis zum Gelblichweiss der Mitte und dem Dunkelroth der Spitze, scheinen auf dasselbe Princip zurückgeführt werden zu müssen. Fraunhofer und David Brewster haben beide bemerkt, dass die Oelflamme, wenn mit dem Löthrohr hineingeblasen wird, hauptsächlich oder ganz aus gelben Strahlen besteht. Dasselbe hatte bereits Melville hinsichtlich der Flamme von Alkohol, in welchen Salpeter, Kochsalz oder andere Salze geworfen waren, bemerkt [3]), und David Brewster fand, dass die Menge gelben Lichtes, welches brennende Körper ver-

---

1) *Phil. Mag., Third Series, vol. IV. p.* 114.

2) *„On Absorption of Light in coloured Media," Edin. Trans. vol. IX.*

3) *Edin. Essays.*

breiten, mit ihrer Feuchtigkeit zunimmt, so dass die Flamme von mit Wasser verdünntem Alkohol fast ein homogenes Gelb giebt [1]). Jedoch ist von noch grösserer Wichtigkeit für die Erläuterung des Emissionsphänomenes aus dem undulatorischen Gesichtspunkte zu bemerken, dass sich oft eine Abhängigkeit der Farbe der Flammen von irgend einer Substanz findet, welche selbst bei dem Process der Verbrennung unverändert bleibt. So bemerkte TALBOT, dass wenn man eine kleine Menge kohlensauren Kalkes auf den Docht einer Spirituslampe brachte, dieselbe einen ganzen Abend lang rothes und grünes Licht zeigte, obgleich die Menge des Kalkes nicht bemerkbar abgenommen hatte. Das Fehlen bestimmter Strahlen in gewissen Lichtern und die festen Linien im Sonnenspektrum hat JOHN HERSCHEL auf dasselbe Princip zurückgeführt, durch welches er die Absorption specifischer Strahlen erklärte [2]).

Im Vorhergehenden haben wir die angenommene Theorie über die Zusammensetzung des Sonnenlichtes, und den Zusammenhang zwischen der Farbe eines Strahles und der Brechbarkeit als richtig gelten lassen. In neuester Zeit hat jedoch DAVID BREWSTER diese Theorie angegriffen. Nach ihm besteht das weisse Licht nur aus drei einfachen Farben, nämlich aus Roth, Gelb und Blau, und das ganze Sonnenspektrum wird aus drei einander überragenden Spektren

---

1) *On a Monochromatic Lamp. Ibid.*

2) *Phil. Mag., Third Series, vol. III. p.* 407. — BREWSTER hat unlängst einen schönen Beitrag zu diesen Erscheinungen geliefert (*Phil. Trans.* 1835. pt. 1. p. 8. POGGEND. Ann. XXXVII. p. 315.) Das oxalsaure Chromoxyd-Kali nämlich zeigte eine merkwürdige specifische Wirkung auf einen bestimmten Strahl im rothen Ende des Spektrums. Die scharfe und schmale dunkle Zone, welche dabei entsteht, bildet in jedem künstlichen Lichte, so wie im Sonnenscheine und Tageslichte eine feste Linie, welche die Physiker in den Stand setzt, das Brechungsvermögen aller Körper in Bezug auf diese Linie mit einer Genauigkeit zu messen. welche sonst nicht zu erlangen ist. Er giebt ihren Ort genau an. A. d. U.

dieser drei Farben gebildet, deren jedesmalige Intensität an dem Punkte am grössten ist, wo diese Farbe im Spektrum am reinsten erscheint. Nach dieser Ansicht sind alle Farben im Sonnenspektrum zusammengesetzte, und bestehen aus Roth, Gelb und Blau in verschiedenem Verhältniss. Diese zusammengesetzten Farben können vermittelst des Prismas nicht so zerlegt werden, dass die Strahlen, aus welchen sie an irgend einem Punkte des Spektrums bestehen, dieselbe Brechbarkeit haben, und nur durch die verschiedene Wirkung absorbirender Mittel auf ihre constituirenden Elemente kann ihre zusammengesetzte Natur entdeckt werden. Jede derselben kann man sich als aus einer gewissen Menge weissen Lichtes und aus einem Ueberschuss von Licht aus zwei der einfachen Farben zusammengesetzt denken, und wenn dieser Ueberschuss absorbirt wird, so wird ein weisses Licht, welches mit dem Prisma nicht weiter zerlegt werden kann, das Resultat sein; dies ist von DAVID BREWSTER auf dem Wege des Experimentes bestätigt worden [1]).

Wenn diese Ansichten einst fest begründet sein werden, so heben sie den von NEWTON aufgestellten Zusammenhang zwischen der Farbe eines Strahles und seiner Brechbarkeit auf, und man muss annehmen, erstere sei nicht von der Länge der Welle, sondern von irgend einem andern Element der schwingenden Bewegung abhängig.

---

1) *„On a New Analysis of Solar Light.“ Edinb. Trans.* 1831. (POGGEND. Ann. XXIII. p. 435.) — CHALLIS hat 1834 bei der Engl. Naturforscherversammlung theoretische Erklärungen mitgetheilt (ganz kurz im: *Fourth Report of the Brit. Assoc. p.* 544 und daraus übersetzt in POGGEND. Annalen XXXVII. p. 528.), welche einen Umstand betreffen, der in der Undulationstheorie übersehen zu sein scheint, nämlich eine Analogie, welche zwischen der Zusammensezzung der Farben und der kleinen Schwingungen vorhanden ist. A. d. U.

III. Diffraktion.

Wir haben bereits angeführt, dass NEWTON die Undulationen eines ätherischen Mediums als einen nothwendigen Theil seiner Theorie betrachtete, und dass diese Theorie, wie sie von ihrem Erfinder aufgestellt wurde, von HUYGENS' und HOOK's Theorie nur dadurch, dass noch eine neue Hypothese dabei nöthig wird, verschieden ist. Die Nothwendigkeit, irgend etwas Fremdes für die Undulationen des Aethers zu Hülfe zu nehmen, scheint sich bei NEWTON nur bei der Erklärung der geradlinigen Fortpflanzung der Lichtstrahlen fühlbar gemacht zu haben, und eine genaue Durchsicht seiner Schriften über optische Gegenstände lässt die Vermuthung zurück, dass NEWTON nicht angestanden haben würde, die Wellentheorie anzunehmen, hätte es den Anschein gehabt als könne sie allein dies Faktum erklären. Das ist an einem andern Orte bereits ausgesprochen, und zugleich gezeigt, wie aus dieser Theorie folge, dass das Licht, welches auf ein Hinderniss trifft, innerhalb des Randes des geometrischen Schattens schnell an Intensität abnehmen müsse. Es bleibt nun noch übrig, das andere Phänomen zu betrachten, welches unter diesen Umständen wahrzunehmen ist, und man wird finden, dass eben diese Theorie die vollständigste Erklärung erlaubt, nicht nur der allgemeinen Charaktere desselben, sondern sogar des numerischen Details.

Um die Theorie der Schatten zu verstehen, ist es nothwendig, die Gesetze in dem einfachen Fall zu erforschen, wo die Grösse des leuchtenden Körpers auf einen Punkt reducirt ist. Die so sich zeigenden Wirkungen wurden zuerst von GRIMALDI beobachtet, und sie sind seitdem als ein besonderer Zweig der Optik, unter der Bezeichnung Diffraktion oder Inflexion weiter erforscht worden. GRIMALDI fand, dass wenn ein kleiner undurchsichtiger Körper in den Lichtkegel gestellt wurde, welchen man durch eine sehr kleine unbedeutende Oeffnung in ein finsteres

Zimmer fallen liess, sein Schatten bei Weitem grösser war, als seine geometrische Projektion, so dass das Licht eine Abweichung von seinem geradlinigen Laufe erlitt, wenn es am Rande vorbeiging. Als er diese Schatten genauer untersuchte, fand er, dass sie von drei regenbogenfarbigen Fransen eingefasst waren, welche mit ihrem Abstande vom Rande des Schattens auch an Breite und Intensität abnahmen, überall aber gleich weit vom Rande entfernt waren, ausgenommen die Stelle, wo der Körper in einer scharfen Spitze endete. Aehnliche Fransen beobachtete man unter günstigen Umständen innerhalb der Schatten schmaler Körper [1]).

Nächstdem beschäftigten sich Hooke und Newton mit den Phänomenen der Diffraktion. Newton's erste Beobachtungen waren nur Wiederholungen von Grimaldi's Versuchen, und es ist merkwürdig, dass er die wichtige Erscheinung der inneren Fransen, von denen der italienische Forscher sprach, völlig übersah. Newton verdanken wir aber die Analyse der Phänomene, soweit sie von der Natur des Lichtes abhängen. Als Newton die verschiedenen Arten einfachen Lichtes, in welche die Sonnenstrahlen durch ein Prisma zerlegt werden, nach einander auf den brechenden Körper fallen liess, bemerkte er, dass die entstandenen Fransen im rothen Lichte am breitesten, im violetten am schmalsten, und im Lichte von mittlerer Brechbarkeit von dazwischenliegender Grösse waren, so dass die regenbogenfarbigen Fransen, welche in weissem Lichte gebildet werden, nur die übereinanderliegenden Fransen verschiedener Farben sind. Von den Beobachtungen Newton's hängen diejenigen, bei welchen er das Licht zwischen zwei eng aneinanderliegenden Messerschärfen, die parallel oder geneigt zu einander standen, hindurchgehen liess, auf's Innigste mit seiner physikalischen Theorie zusammen. Aus diesen Beobachtungen schloss Newton, dass das Licht der ersten Franse in einer Entfernung, die grösser ist als $\frac{1}{800}$

---

1) *Physico-Mathesis de Lumine. Bologna*, 1665.

engl. Zoll, das der zweiten und dritten Franse in noch grösseren Entfernungen am Rande vorbeigehe. Diese Entfernungen blieben indess nicht dieselben für alle Stellen, wo die Fransen gebildet wurden, und es schien aus dem Versuch hervorzugehen, dass das Licht ein und derselben Franse nicht bei allen Entfernungen dasselbe bleibe, sondern, dass eine jede Franse gleichsam eine Brennlinie sei, welche von den Durchschneidungen der Strahlen, die in verschiedenen Entfernungen vom Rande vorbeigehen, gebildet werden; der Theil der Franse, welcher nahe an den Schneiden liegt, entsteht durch Licht, welches am nächsten am Rande vorbeiging und am meisten gebeugt wurde [1]).

Zur Erklärung dieser Phänomene nahm NEWTON an, die Lichtstrahlen würden beim Vorbeigehen vor den Rändern der Körper vermöge der Wirkung anziehender und abstossender Kräfte, welche die Molekeln der Körper auf die des Lichtes in merklichen Entfernungen ausüben sollten, gebeugt. Er glaubte also, die Strahlen würden, wenn sie an den Rändern eines schmalen undurchsichtigen Körpers vorbeigingen, durch Abstossung nach der Seite abgelenkt, und da diese Kraft schnell abnimmt, sobald die Entfernung grösser wird, so werden diejenigen Strahlen, welche in einiger Entfernung vom Körper vorbeigehen, weniger abgelenkt werden, als diejenigen, welche dicht daran vorbeigehen. Die durch das Schneiden dieser abgelenkten Strahlen gebildete Brennlinie wird nach innen concav sein, und da kein Strahl in ihre Krümmung gelangt, so wird sie die Grenze des sichtbaren Schattens machen. Um den Wechsel von Dunkel und Licht jenseit dieser Linie zu erklären, scheint NEWTON angenommen zu haben, die anziehenden und abstossenden Kräfte wirkten einige Mal abwechselnd nach einander, und die einen jeden Strahl bildenden Molekel würden, wenn sie vor dem Strahle vorbeigehen, durch diese Kräfte „mit einer Bewegung ähnlich der eines

1) *Optice. Lib. III.*

Aales" hin- und hergebeugt, und endlich an dem einen oder andern Punkt entgegengesetzter Beugung herausgeworfen. Die Zerlegung des weissen Lichtes in seine Elemente erklärte er durch die Annahme, dass die Strahlen, welche verschiedene Brechbarkeit haben, auch hinsichtlich des Beugungsvermögens verschieden sind, indem der Körper auf die weniger brechbaren Strahlen bei grösserer Entfernung, und auf die stärker brechbaren Strahlen in geringerer Entfernung gleich wirkt [1]). In einem seiner Briefe an OLDENBURG [2]) entwickelt NEWTON eine feinere Theorie der Diffraktion. Er glaubte, dass das Beugen des Strahles nahe am Rande des Gegenstandes von einer veränderten Dichtigkeit des Aethers in der Nähe des Körpers herrühre, und indem er der Analogie mit dünnen Blättchen folgte, versuchte er, die farbigen Fransen durch die Aethervibrationen zu erklären, welche schneller fortgepflanzt werden, als die Strahlen selbst, und sie in der Mitte des gekrümmten Theiles der Trajektorie, welche sie beschreiben, einholen.

Wir haben nicht nöthig auf das Vague in diesen Erklärungen aufmerksam zu machen. NEWTON selbst genügten sie keinesweges, und er hat uns die ganze Sache unvollendet hinterlassen. Indessen müssen die blossen Vermuthungen eines Mannes wie NEWTON ein hohes Interesse besitzen, und wir dürfen uns nicht wundern, dass diese Erklärungen bei seinen Nachfolgern mehr Gewicht hatten, als er selbst ihnen je beigelegt. Es scheint daher nothwendig, auf einige Umstände bei diesen Erscheinungen aufmerksam zu sein, welche durch diese Theorie nicht nur nicht erklärt werden, sondern welche sogar durchaus unvereinbar damit scheinen.

Wären die Phänomene der Inflexion die Wirkungen von anziehenden und abstossenden Kräften, welche von dem da-

---

1) *Optice, Lib. III. Quaes.* 1, 2, 3, 4.
2) 21 Dezember, 1675. — *BIRCH's History of Royal Society, vol. III.*

zwischengehaltenen Körper ausgehen, und wären diese Kräfte dieselben, oder selbst analog denen, welchen die Reflexion und Refraktion des Lichtes in der Emissionstheorie zugeschrieben werden, so folgt, dass sie in verschiedenen Körpern in sehr verschiedenen Graden vorhanden sein müssen, so dass die Grösse der Ablenkung der Strahlen, und daher die Lage der Fransen, sich mit der Masse oder Natur und Gestalt des abbeugenden Körpers ändern muss. Nun ist es im Gegentheil klar erwiesen, dass alle Körper, was auch ihre Natur oder von welcher Gestalt ihre Ränder sein mögen, unter denselben Umständen vollkommen dieselben Fransen hervorbringen; und in der That scheint das theilweise Auffangen des Lichtes, welches durch das Dazwischenstellen irgend eines Hindernisses verursacht wird, die einzige Bedingung zu sein, von welcher die Eigenthümlichkeit dieser Erscheinung abhängig ist. s'Gravesand scheint zuerst bemerkt zu haben, dass die Natur oder die Dichtigkeit des Körpers keinen Einfluss auf die Grösse der Beugungsfransen äussert, und seitdem ist diese Thatsache durch fast jeden Forscher in diesem Zweige der experimentellen Wissenschaft auf's Vollständigste bestätigt worden. Einer der geschicktesten Vertheidiger der Emissionstheorie hat angenommen, die beugenden Kräfte müssten, wenn sie vorhanden wären, unabhängig von der chemischen Beschaffenheit des ablenkenden Körpers und ihrer Natur nach vollkommen verschieden von denen sein, welchen in derselben Theorie die Phänomene der Reflexion nnd Refraktion zugeschrieben werden [1]). Um zu erfahren, ob die Gestalt des Randes irgend einen Einfluss auf die Fransen habe, nahm Fresnel zwei Stahlplatten, deren Rand zur Hälfte abgerundet, und zur Hälfte zugeschärft war, und stellte den runden Theil eines Randes dem scharfen des andern gegenüber, und so umgekehrt. Wenn nun die Lage der Fransen von der Gestalt der Oberfläche abhinge, so würde die

1) *Biot, Précis élémentaire, vol. II. p.* 473, 3. *Edition.*

Wirkung also verdoppelt sein, und die Fransen mitten durchgebrochen erscheinen. Im Gegentheil fand er, dass sie ihrer ganzen Länge nach vollkommen gerade waren [1]).

Nun kann man aber nicht annehmen, die abbeugenden Kräfte (obgleich man sich denken muss, sie änderten sich in der Intensität mit der Gestalt und Masse des Körpers, so wie mit der Entfernung des leuchtenden Molekels vom Rande) hängen irgend wie von der vom Molekel, bevor es in die Nähe des Randes kommt, durchlaufenen Entfernung ab, so dass die Grösse und Lage der Fransen nach dieser Hypothese sich durchaus nicht mit der Entfernung des abbeugenden Randes von dem leuchtenden Punkte ändern kann. Aber diesem Schlusse widerspricht die Thatsache geradezu: die Fransen breiten sich aus, und ihre Neigung gegen einander nimmt zu, sobald der Schirm der leuchtenden Quelle genähert wird. Es scheint nur ein Weg offen, auf welchem man dem aus diesem Faktum gegen die Emissionstheorie gezogenen Schluss aus dem Wege gehen kann. Man kann annehmen, dass die Streifen in einem bemerkbaren Abstande vom Rande des Körpers entstehen, und dass also die Schiefe des einfallenden Strahles sich ändert, sobald der Rand sich

1) *Mémoire sur la Diffraction*, p. 370. — Poggend. Ann. XXX. p. 134. Das *Bulletin universel*, Februar 1828, enthält einige Einwürfe gegen diesen Theil von Fresnel's optischen Arbeiten, in einer vom Sekretär der Akademie der Wissenschaften zu St Petersburg unterzeichneten Abhandlung, welche eine officielle Erwiderung auf einige Bemerkungen in einer früheren Nummer des Bülletins über das Programm der von der Akademie gestellten Preisfragen enthält. Die Verfasser haben zwei Experimente Fresnel's, welche zu verschiedenen Zwecken angestellt und verschieden besprochen waren, mit einander verwechselt. Fresnel's Absicht bei diesem Versuch war nur, zu zeigen, dass die Gestalt des Randes keinen Einfluss auf die Fransen habe, was doch der Fall sein müsste, wenn die Beugung von anziehenden und abstossenden Kräften herrührte, welche sich auf bemerkbare Entfernung vom Körper erstreckten. Die meisten der in jener Abhandlung gegen die Wellentheorie vorgebrachten Einwürfe rühren ebenfalls von Missverständnissen her.

dem leuchtenden Punkte nähert. So muthmasste Dutour, welcher dieses Faktums zuerst erwähnt. Fresnel berechnete die Breite der Fransen nach seiner Annahme, und fand, dass die berechneten und durch das Experiment sich ergebenden Resultate nicht übereinstimmten [1]). Aber das Faktum erlaubt die Annahme, ohne dass man merklich irrt, dass die Streifen am Rande selbst entstehen. Fresnel fand durch direkte Messung, dass die Entfernung des dritten Streifen vom Rande des Schattens an seinem Ursprunge weniger als der 100ste Theil eines Millimeters betrug.

Die Einwürfe, welche wir so eben beobachteten, scheinen sowohl auf Mairan's als Dutour's Hypothese, in welchen die Phänomene der Diffraktion auf die Reflexionen und Refraktionen einer angeblich alle Körper umgebenden Atmosphäre zurückgeführt werden, anwendbar. Denn wenn eine solche Atmosphäre vermöge der Anziehung des Körpers um diesen bestände (und dies scheint die einzige Erklärungsart ihres Vorhandenseins), so muss ihre Dichtigkeit und ihre Gestalt sich mit der des Körpers selbst ändern, und folglich müssen sich auch ihre Wirkungen auf die Lichtstrahlen ändern. Aber Haldat's Versuche [2]) scheinen keinen haltbaren Grund für diese Hypothesen übrig zu lassen. Ein jedes Agens ist versucht, welches man für fähig hielt, die anziehende Kraft des Körpers, oder die Dichtigkeit der gedachten Atmosphäre zu modificiren, und ganz ohne Erfolg. Die metallenen Drähte und Platten, welche die Fransen hervorbrachten, wurden bis zum Rothglühen erhitzt, und bis unter den Nullpunkt erkältet; man liess galvanische Ströme hindurchgehen, und entlud starke Batterien durch sie; aber wie man auch den Zustand des abbeugenden Körpers änderte,

---

1) *Mémoire sur la diffraction de la lumière. Mém. de l'Institut, tom. V. p.* 353. (Poggend. Ann. XXX. p. 118.)

2) Ganz kurz in Schweigger's Jahrbuch. 1830. Bd. XXVIII. p. 76.

man bemerkte durchaus keine Veränderung, weder in der Intensität, noch in den Dimensionen der Fransen [1]).

Obwohl die Phänomene der Diffraktion nach der Herausgabe der *Optice* von vielen fleissigen Forschern [2]) studirt wurden, so erlangte unsere Kenntniss der Gesetze doch keinen wesentlichen Zuwachs, ehe die Principien der Wellentheorie von Young zur Erklärung derselben angewandt wurden. Die äusseren Fransen, welche ausserhalb der Schatten der Körper gebildet werden, schrieb Young der Interferenz zweier Theile von Licht zu, von denen der eine am Körper vorbeigeht, und mehr oder weniger gebeugt wird, während der andere schief von seinem Rande reflektirt wird, und im Augenblick der Reflexion eine halbe Undulation verliert [3]). Ebenso nahm er an, die von schmalen Oeffnungen gebildeten Fransen rührten von der Interferenz der beiden von den gegenüherstehenden Rändern reflektirten Bündeln her, während die inneren Fransen, innerhalb der Schatten schmaler Körper, durch Interferenz der Bündel erklärt wurden, welche auf jeder Seite des Körpers in unmerklicher Entfernung vorbeigingen, und in den Schatten hineingebeugt würden. Die beobachteten Thatsachen stimmen vollkommen mit den berechneten Resultaten dieser Theorie, und im letzterwähnten Falle bewies Young, dass die Phänomene keine andere Erklärung zulassen. Als er einen kleinen dunkeln Schirm auf jeder Seite des abbeugenden Körpers aufstellte, so dass er den Theil des Lichtes, welcher an einer seiner beiden Ränder vorbeiging, auffing, so verschwanden die

---

1) *„Sur les causes de la diffraction.“ Annales de Chimie. tom. XLI.* Aehnliche Experimente hatte einige Zeit vorher Mayer, und zwar mit demselben Erfolge gemacht. Göttinger Memoiren tom. IV.

2) *Maraldi (Mém. Acad. Par.* 1723*), Mairan (ibid.* 1738*), Dutour (Mémoires présentes, tom. V.), Brougham (Phil. Trans.* 1796—7*)*, und *Jordan (New Observations concerning the Inflexion of Light. London* 1795.*)*

3) *„On the Theory of Light and Colours.“ Phil. Trans.* 1802.

Streifen auf der Stelle, obschon das am anderen Rande vorbeigehende Licht unverändert blieb. Dieselbe Wirkung, und zwar mit denselben Mitteln, erfolgte bei GRIMALDI's kammförmigen Fransen, welche innerhalb der Schatten von Körpern mit rechtwinkliger Begrenzung gebildet werden [1]). So ist das Phänomen der Fransen, oder der Wechsel von Hell und Dunkel als ein einzelner Fall des allgemeineren Princips der Interferenz dargelegt, und dieser Zusammenhang ist jetzt von einigen der eifrigsten Vertheidigern der NEWTON'schen Theorie angenommen [2]). Das Beugen des Lichtes in den Schatten hinein, oder das Faktum der Inflexion selbst, schrieb YOUNG zuerst der Refraktion einer ätherartigen Atmosphäre zu, welche die Körper umgeben, und welche mit der Entstehung an Dichtigkeit abnehmen sollte. Später nahm er jedoch HUYGENS' und GRIMALDI's einfachere Erklärung an, und führte das Phänomen auf die Grundeigenschaft der Wellen zurück.

Aber vielleicht ist die wichtigste unter YOUNG's Arbeiten über diesen Gegenstand diejenige, in welcher er bis auf's numerische Detail geht; bei NEWTON's Beobachtungen sowohl, als bei seinen eigenen, berechnete er die Längenunterschiede der von beiden Bündeln durchlaufenen Wege, wenn sie einander durch Interferenz zerstören oder sich verstärken. Er fand, dass diese Intervalle für die auf einanderfolgenden Streifen eine arithmetische Progression bildeten, in welcher die erste Grösse dieselbe ist bei ein und derselben Lichtart, in welcher Entfernung man auch die Fransen auffangen mag, oder was sonst für Umstände bei den Experimenten eintreten mögen. Und als er diese Constanten mit den ähnlichen Intervallen der beiden, von den Oberflächen dünner Blättchen zurückgeworfenen Bündeln, wie sie sich aus NEWTON's Versuchen ergeben, verglich, fand er schliesslich, dass ihre Differenz innerhalb der Grenzen

1) *Experiments and Calculations relative to Physical Optics." Phil. Trans.* 1804.

2) *BIOT, Précis élémentaire. vol. II. p.* 472. 3. *Edit.*

des Irrthums lagen, welcher bei solchen Beobachtungen unvermeidlich ist, und dass wir zu dem Schluss berechtigt sind, dass sich beide Klassen von Erscheinungen auf dasselbe einfache Princip zurükführen lassen[1]). Man kann nicht läugnen, dass YOUNG bei diesen Berechnungen von einem irrigen Princip hinsichtlich der Lichter ausgeht, welche die gebeugten Fransen vermöge ihrer Interferenz bilden, und er bemerkte, dass seine Resultate hie und da nicht übereinstimmten, was ohne Zweifel von diesem Umstande herrührt; aber die Resultate der genauen Theorie sind nicht bedeutend von denen verschieden, welche er erhielt, und FRESNEL's vollständigere Analyse hat nur den von YOUNG gemachten Schluss bestätigt.

YOUNG's wichtiger Versuch über das Verschwinden der Fransen im Schatten eines schmalen undurchsichtigen Körpers, wenn das an einer seiner Seiten vorbeigehende Licht aufgefangen wurde, führte ihn zuerst zur Lehre von der Interferenz. ARAGO machte eine lehrreiche Abänderung dieses Versuches. Man fand, dass die inneren Fransen gleichfalls verschwanden, wenn man das an einer Seite vorbeigehende Licht durch eine Platte irgend einer durchsichtigen Substanz fallen liess, und ARAGO entdeckte, indem er die Dicke der dazwischengehaltenen Platte änderte, dass das Verschwinden der Fransen in diesem Falle von ihrer Verrückung herrühre, indem die Streifen stets nach der Seite fortrückten, auf welcher die Platte dazwischen gehalten wurde[2]). ARAGO brachte später dieselbe Wirkung auf Interferenzstreifen hervor, welche von zwei Spiegeln gebildet wurden, und der Versuch ist in dieser Gestalt für die beiden Theorien des Lichtes ein vollkommenes *experimentum crucis*. Die Grösse der Verrückung bestimmt die Geschwindigkeit des Lichtes im Medium, und daher den Brechungs-

1) *Ibid.*
2) *Sur un Phénomène remarquable qui s'observe dans la diffraction de la lumière.*" *Annales du Chimie, tom.* 1.

index, mit einer Genauigkeit, welche mit einer andern Methode unerreichbar ist. POWELL führt eine sehr nette Abänderung dieses Versuches an, welche auf der Stelle die Wahrheit des Gesetzes zeigt, dass die Geschwindigkeit des Lichtes sich umgekehrt wie der Brechungsindex des Mediums verhält, durch welches das Licht ging [1]).

Die experimentellen Gesetze der Beugungsfransen wurden darauf zunächst von BIOT und POUILLET untersucht. In dem Falle, wo man es mit einer schmalen, geradlinigen Oeffnung zu thun hat (welcher hauptsächlich studirt wurde), fanden sie, dass die Abweichungen, welche sich bei den verschiedenen Arten von einfachem Licht ergaben, oder die Entfernungen der Streifen von der Axe des Bündels in jedem Falle den Längen der Anwandlungen proportional waren, wenn nur die Weite der Oeffnung unverändert blieb. Dieselbe Analogie bestand in verschiedenen Medien, so dass die Abweichungen sich umgekehrt wie die Brechungsindices der Media, oder direkt wie die Anwandlungen verhalten [2]). POUILLET fügt hinzu, dass sie nicht im Stande waren, diese Gesetze zu erklären, da sie von der Emissionstheorie ausgingen [3]). Sie sind sämmtlich einfache Folgerungen aus der Wellentheorie. Das Intervall zwischen den Anwandlungen ist genau die halbe Wellenlänge, und der wahre Zusammenhang zwischen der Stelle, wo die Fransen erscheinen, und dieser letzteren Grösse ist bereits von YOUNG dargethan worden.

MAYER beschäftigte sich darauf mit den Phänomenen der Beugung, aber ohne neue Thatsachen zu den bereits bekannten hinzuzufügen. Was seine Theorie betrifft, so folgte er der NEWTON'schen, mit einigen Modifikationen. Wie NEWTON schrieb er die Beugung des Lichtes nach dem Inneren des Schattens der Wirkung einer anziehenden

1) *Phil. Mag., Second Series, vol. XI. p.* 6.
2) *BIOT, Traité de Physique, tom. IV., Supplement à l'Optique.*
3) *Elemens de Physique, tom. II. p.* 437.

Kraft zu; aber da er keine abstossende Kraft annehmen wollte, so versuchte er, die Deflexion durch das Zusammentreffen der vom Rande reflektirten Molekeln mit denen, welche bei demselben vorbeigingen, zu erklären [1]).

FRESNEL nahm zuerst YOUNG's Diffraktionstheorie wieder auf, entwickelte sie weiter, und fand, dass die allgemeinen Gesetze der Fransen, — die Abhängigkeit ihrer Grösse von der Wellenlänge, und von der Entfernung des leuchtenden Gegenstandes und des Schirmes —, vollkommen damit erklärt würden. Er zeigte, dass die auf einander folgenden Punkte, in welchen ein und derselbe Streif gebildet wird, wenn man den Schirm verschiebt, nicht in einer geraden Linie, sondern in einer Hyperbel liegen; und dass, wenn die Entfernung der Lichtquelle verringert wird, die Neigung dieser Hyperbelarme, als mit ihren Asymptoten zusammenfallend betrachtet, zunehmen, und die Fransen breiter werden [2]). FRESNEL genügte jedoch bald seine Theorie nicht mehr. Wenn die äusseren Streifen von der Interferenz des direkten und reflektirten Lichtes herrührten, so müsste ihre Intensität von der Krümmung des Randes abhängig sein; man findet aber dagegen, dass die vom Rücken und der Schneide eines Rasirmessers gebildeten Fransen einander in jeder Hinsicht vollkommen gleich sind. Was die andern Fälle der Beugung betrifft, so beweisen viele Erscheinungen, und besonders diejenigen, welche sich bei NEWTON's Versuch mit den beiden Messerschärfen zeigten, dass die Strahlen, welche die Ränder des Körpers streiften, nicht die einzigen Strahlen seien, welche bei der Entstehung von Fransen im Spiele sind, sondern dass das Licht, welches in merklichen Entfernungen bei diesen Rändern vorbeiging, ebenfalls abgelenkt wurde, und zu deren Bildung beitrug [3]).

---

1) *Comm. Soc. Gottingensis Recentiores, vol. IV. p.* 49.

2) *Annales de Chimie, tom. I.* 239.

3) *Mémoires sur la diffraction de la lumière, p* 368. (POGGEND. Ann. XXX. p. 132.)

So wurde Fresnel dazu gebracht, eine tüchtigere Grundlage für seine Theorie zu suchen, und das Resultat seiner Forschungen findet sich in der von der Französischen Akademie 1810 gekrönten Abhandlung. Darin sind die Diffraktionsgesetze von den beiden Principien abgeleitet, auf welche die Gesetze der Reflexion und Refraktion ebenfalls zurückgeführt sind, — das der Interferenz und das Huygens'sche Princip. Um diese Principien auf den gegenwärtigen Fall anzuwenden, nahm Fresnel an, die Oberfläche der Welle werde, wenn sie das Hinderniss erreicht, in eine unendliche Anzahl gleicher Theile zertheilt, und er wendet die in diesem Memoire entwickelten mathematischen Gesetze der Interferenz zur Bestimmung der Resultante aller der elementaren Wellen, welche von ihr in ein und demselben Augenblick nach irgend einem Punkte hingesendet werden, an. Die Resultante wird durch zwei Integrale ausgedrückt, und die Grenzen, innerhalb welcher sie genommen werden, durch die besondere Natur des Problems bestimmt. Ihr Quadrat ist das Maass für die Intensität des Lichtes, und es hat sich ergeben, dass ihr Werth verschiedene Maxima und Minima hat, welche den Intensitäten des Lichtes in den hellen und den dunklen Streifen entsprechen.

So wurde das Problem der Diffraktion vollkommen gelöst, und es bleibt nur noch übrig, die Lösung auf die besonderen Fälle anzuwenden, und die Resultate mit denen der Beobachtung zu vergleichen. Die Fälle der Diffraktion, welche Fresnel auswählte, sind 1) das durch eine einfache gerade Schneide hervorgebrachte Phänomen; 2) das durch eine von parallelen geraden Schneiden begrenzte Oeffnung hervorgebrachte, und 3) das durch einen schmalen undurchsichtigen Körper von derselben Gestalt hervorgebrachte. Die Uebereinstimmung von Beobachtung und Theorie ist so vollkommen, dass die berechneten Orte der einzelnen Streifen von den beobachteten selten um mehr als den 100sten Theil eines Millimeters abweichen, nur den Fall der Diffraktion vermittelst enger Oeffnungen ausgenommen. Die geringen Un-

Unterschiede zwischen Beobachtung und Theorie in diesem Falle schreibt FRESNEL einem falschen Urtheil des Auges über die Lage des Mittelpunktes der dunklen Linien zu, veranlasst durch die verschiedenen Intensitäten der hellen Streifen auf jeder Seite, so dass das Minimum stets dem helleren Lichte näher erscheint, als es wirklich ist. Er fand, dass die berechneten Orte der Fransen im ersteren Falle der Diffraktion von den aus YOUNG's Hypothese hergeleiteten, um eine geringe numerische Grösse abwichen, indem die Entfernung des ersten dunkeln Streifens nach der ersteren Theorie geringer war, und zwar in dem Verhältniss wie 0,936 zu 1; aber so gering der Unterschied auch ist, so entscheiden FRESNEL's Messungen doch die Frage vollkommen [1]).

POISSON wendete FRESNEL's Integral auf den Fall der Diffraktion vermittelst einer undurchsichtigen, kreisförmigen Scheibe an, und gelangte zu dem sonderbaren Resultate, dass die Intensität des Lichtes im Mittelpunkte des Schattens genau dieselbe ist, als wenn die Scheibe nicht da wäre. Diese merkwürdige Anticipation der Theorie ist durch ARAGO's Beobachtung [2]) bestätigt. FRESNEL löste selbst das Problem in dem analogen Falle mit einer kreisförmigen Oeffnung, und kam zu dem Resultat, dass die Intensität des Lichtes von irgend einer Farbe am Mittelpunkte dieselbe sein werde, wie die von einer Luftschicht reflektirte, deren Dicke in einem gewissen einfachen Verhältniss zum Radius der Oeffnung und zu ihren Entfernungen von der leuchtenden Quelle und vom Auge steht. Bei homogenem Lichte verschwindet daher die Erleuchtung des Mittelpunktes periodisch, sobald sich die Entfernung des Auges von der Oeffnung ändert, und in weissem Lichte nimmt sie nach und nach die lebhaftesten und schönsten Färbungen an, welche mit denen der reflektirten Ringe dünner Blättchen

---

1) A. zuletzt a. O. p. 420. (POGGEND. Ann. XXX. p. 218 ff.)

2) *Mémoires sur la diffraction*, p. 460. (POGGEND. Ann. XXX. p. 235.)

übereinstimmen. Diese interessanten Erscheinungen wurden um dieselbe Zeit von John Herschel beobachtet, und ihre Gesetze, unabhängig, aus der Beobachtung hergeleitet[1]).

Mit Ausnahme dieser angeführten Beobachtungen ist kein Versuch gemacht worden, die Theorie durch Vergleichung der Lichtintensität in den Fransen mit der aus der Formel hergeleiteten, zu bestätigen, und offenbar ist man wenig berechtigt, von einer solchen Vergleichung irgend einen entscheidenden Beweis über diese Frage zu erwarten. Fresnel glaubte jedoch, dass sich der Ausdruck für die Intensität indirekt bestätigen lassen möchte, wenn man zwei Reihen von Fransen (wie die inneren und äusseren eines schmalen, undurchsichtigen Körpers) vermöge doppelter Refraktion über einander gelegt sich vorstellte, und nun die Lage der neuen Maxima und Minima bestimmte. Diese scharfsinnige Vermuthung scheint sich nicht bestätigt zu haben.

Die Intensität des Lichtes in den partiellen Wellen, welche von jedem Punkte der primären Welle, wenn man ihn als einen besonderen Erschütterungsmittelpunkt betrachtet, ausgehen, wird nothwendig nach den verschiedenen Richtungen verschieden sein, je nach dem Winkel, welche diese Richtungen mit der vordern Fläche der ursprünglichen Welle machen, und um das Problem der Diffraktion in seiner allgemeinsten Gestalt zu lösen, würde es nothwendig sein, das Gesetz dieser Aenderung zu kennen. Fresnel hat jedoch gezeigt, dass diejenigen Strahlen, deren Richtungen unter bedeutenderen Winkeln gegen die Senkrechte auf die Vorderseite der primären Welle geneigt sind, einander durch Interferenz zerstören, so dass die hervorgehende Wirkung durch Strahlen erzeugt wird, welche jener Senkrechten unendlich nahe sind, und welche daher als von gleicher Intensität betrachtet werden können. Poisson hat die Wahrheit dieser Annahme bestritten. Dieser Mathematiker schloss

1) Vom Licht. Art. 729.

aus seiner Theorie der Fortpflanzung der Bewegung durch flüssige Media, dass die absoluten Geschwindigkeiten der Molekeln unmerklich seien in Richtungen, welche mit der Richtung der ursprünglichen Vibrationen endliche Winkel machen. Er schliesst daraus, dass diese Geschwindigkeiten oder die Intensität des Lichtes in den partiellen Wellen in Richtungen, welche gegen sie unter sehr kleinen Winkeln geneigt sind, nicht als gleich betrachtet werden können[1]). FRESNEL's Erwiderung auf diesen Theil der POISSON'schen Theorie haben wir bereits angeführt. HUYGENS' Princip selbst, welches die Grundlage der FRESNEL'schen Theorie ausmacht, ist, obwohl von POISSON nicht geläugnet, doch der Vorwurf gemacht, dass es die Frage unnöthig verwickelt mache, und wirklich scheint es nicht leicht auf den ersten Blick einzusehen, warum ein jeder Punkt der primären Welle bei dieser Art von Zusammengesetztheit nicht eben so gut eine sich nach rückwärts bewegende Welle geben sollte, als eine vorwärtsgehende[2]).

Einen Einwurf anderer Art gegen FRESNEL's Hypothese hat man von der Voraussetzung ihres Nichtübereinstimmens mit den Phänomenen hergenommen. Es folgt aus jener Theorie, wenn man sie auf den Fall der Diffraktion vermittelst einer engen, von parallelen geraden Rändern begrenzten Oeffnung anwendet, dass wenn ein Punkt so in die Axe des Lichtbündels gehalten wird, dass seine Entfernungen vom Mittelpunkte und dem Rande der Oeffnung um eine halbe Wellenlänge differiren, dieser Punkt die Grenze sein würde, innerhalb welcher alle inneren Fransen beschränkt sind, und dass jenseits dieses Punktes der Mittelpunkt des Bildes stets weiss sein werde. Dieses Resultat wurde bestätigt durch die vorhergegangenen Ver-

1) Es ist wohl nothwendig anzuführen, dass es zu POISSONS Theorie gehört, dass die Vibrationen normal gegen die Welle sind.

2) Siehe *Annales de Chimie, tom. XXII. p.* 270. und *AIRY's Math. Tract. p.* 267.

suche BIOT'S, durch die Beobachtungen FRESNEL'S selbst, so wie durch die AIRY'S und POWELL'S, von welchen sie später wiederholt wurden. BIOT fand, dass der mittlere Streif abwechselnd dunkel und weiss war bei einer gewissen Entfernung von der Oeffnung; jenseit derselben war er stets weiss. Er bemerkte, dass wenn man an diese Grenze gekommen sei, man die Breite der Oeffnung verringern, und sogar ihre Seiten in wirkliche Berührung bringen könne, ohne dass irgend eine andere Veränderung mit dem mittleren Streif vor sich gehe, als dass er breiter würde, und folglich an Intensität abnähme [1]).

NEWTON'S berühmter Versuch mit zwei Schneiden ist diesen Resultaten entgegengestellt worden. NEWTON fand, dass wenn die Entfernung dieser Ränder ein 400stel Zoll betrug, das Licht, welches zwischen den Schneiden hindurchging, in der Mitte getheilt wurde, und einen dunkeln Fleck im Mittelpunkte erzeugte [2]). Der Versuch ist von BARTON wiederholt worden, und zwar mit einem ähnlichen Resultat [3]). Diese Versuche wurden jedoch mit gekrümmten Rändern gemacht, und wie POWELL bemerkt hat, haben wir keinen Grund anzunehmen, dass das Phänomen durch diese Veränderung nicht in den Bedingungen modificirt werde, unter welchen es sich zeigt. FRESNEL'S Theorie ist nicht auf das zusammengesetztere Problem einer Oeffnung mit krummlinigten Rändern angewendet, und die analytischen Schwierigkeiten bei diesem Problem scheinen unüberwindlich. Indessen hinsichtlich des Phänomens selbst

---

1) *Traité de Physique, tom. IV. p.* 749, 760. Die von MAYER gegebene Beschreibung des Phänomenes ist sehr ähnlich: *Prout illa distantia acierum semper magis magisque imminuitur, fasciae adeo evanescunt, ita ut denique non nisi fascia media remaneat; sed ad dextram atque sinistram adeo in latitudinem extensa, ut non nisi lumen languidum, a medio spectri initialis utrinque instar caudae cometae sese dilatans, representet.* Göttinger Memoiren Th. IV. p. 61.

2) *Optice Libr. X. Obs. VI* und *VII.*

3) *Phil. Mag. vol. II. p.* 268.

waltet wohl einige Unsicherheit ob. POWELL wiederholte den Versuch mit Rändern von verschiedener Krümmung, und fand stets, dass der Mittelpunkt ein Punkt relativer Helligkeit war, im Vergleich mit anderen Punkten der senkrecht gegen die Länge der Oeffnung stehenden Linie [1]). Was NEWTON'S Versuch betrifft, so scheint es gewiss, wie auch derselbe Schriftsteller bemerkt, dass wir nicht mit allen Bedingungen desselben bekannt sind, und es ergiebt sich aus manchen Stellen, dass der berühmte Beobachter selbst weit davon entfernt war, über die wirkliche Natur und die Umstände dieser Erscheinungen im Klaren zu sein [2]).

Aber wir haben noch einen andern wesentlichen Umstand zu berücksichtigen, wenn wir NEWTON'S Versuche mit den Resultaten der FRESNEL'schen Theorie vergleichen. Nach dieser Theorie ist die Lichtquelle ein Punkt, und dieser Bedingung thut man Genüge, wenn man das Licht von dem Brennpunkt einer Linse von grossem Brechungsvermögen ausgehen lässt, indem die Lichtquelle in diesem Falle (nach den Grundsätzen der Wellentheorie) das kleine Sonnenbild im Focus ist. Bei NEWTON'S Versuche ging aber das Licht durch eine Oeffnung von ziemlicher Grösse, und in dem so eben angeführten merkwürdigen Falle hatte diese Oeffnung $\frac{1}{4}$ Zoll im Durchmesser. Das Problem der Diffraktion ist in diesem Falle höchst zusammengesetzt. Es ist nothwendig, die vereinigte Wirkung zu bestimmen, welche an irgend einem Punkte der Oeffnung durch die einzelnen unendlich kleinen Theile einer Welle, die durch das äussere

1) *Ibid. p.* 429 etc.

2) „Auch den Gegenstand des dritten Buches habe ich unvollendet gelassen, da ich weder alle Versuche angestellt habe, welche ich beabsichtigte, als ich mich mit diesen Dingen beschäftigte, noch einige derjenigen wiederholt habe, welche ich so lange anstellte, bis ich hinlänglich mit allen dabei obwaltenden Umständen vertraut war. Mein einziger Zweck bei der Veröffentlichung dieser Arbeiten ist, mitzutheilen, was ich geprüft habe, und das Uebrige Andern zu künftigen Untersuchungen zu überlassen“ *Optice Advert. I.* Siehe auch den letzteren Theil der *Obs. Libr.* III.

Loch hindurchgeht, hervorgebracht wird, und wenn man einen jeden derselben als einen neuen Störungsmittelpunkt ansieht, ihre totale Resultante an irgend einem Punkte des Schirmes, auf welchem die Fransen aufgefangen werden, zu finden. Die Lösungsmethode ist von Airy angegeben, und er hat gezeigt, dass wenn das äussere Loch ein rechtwinkliges Parallelogramm, und die beugende Oeffnung von derselben Gestalt und in ähnlicher Stellung ist, das Gesetz der Erhellung an irgend einem Punkte eines Schirmes dem von einer rhombischen Oeffnung hervorgebrachten ähnlich sein wird, (wie bei Fresnel's Beobachtungsmethode), und dass die Dimensionen und die Entfernungen in beiden Fällen in bestimmten Relationen stehen [1]). Airy schliesst daraus, dass die Grösse des äusseren Loches nicht den dunkeln Schatten im Mittelpunkte erklären könne, dessen Newton in seiner sechsten Beobachtung erwähnt. Er hat diesen Schluss durch einen Versuch bestätigt, und durch die Anwendung von verschiedenen Löchern fand er den mittleren Streif in jedem Falle hell. Die von Newton erwähnte Wirkung schreibt Airy dem Einflusse des Contrastes auf die Retina zu.

Eine merkwürdige Klasse von Erscheinungen entsteht, wenn eine Linse dicht an eine Oeffnung von beliebiger Form gebracht, und das Licht auf einem Schirm im Brennpunkte derselben, oder auf einem Augenglase in ihrer Brennweite aufgefangen wird. Die Phänomene der Diffraktion wurden auf diese Weise mit Oeffnungen von beträchtlichen Dimensionen hervorgebracht, und von William Herschel mit der unverminderten Oeffnung seines grossen Teleskops beobachtet; er sah die Sterne mit mehreren dunkeln und hellen Ringen umgeben, welche einander in gleichen Entfernungen folgten, wenn er ein bedeutendes Brechungsvermögen an-

---

1) *„On the Calculation of Newton's Experiments on Diffraction."* *Cambridge Trans. vol. V. part.* 2. (Poggend. Ann. XXXIII. p. 389.)

wendete[1]). Aber die Erscheinungen wurden bestimmter, wenn die Oeffnung durch eine Blendung von mässiger Grösse verringert wurde, wobei sich die Durchmesser der Ringe umgekehrt wie die der Oeffnungen verhielten. Die durch Blendungen von verschiedenen Grössen und Gestalten hervorgebrachten Wirkungen sind genauer von JOHN HERSCHEL und ARAGO untersucht[2]).

Die durch geringe Oeffnungen hervorgebrachten Phänomene, zugleich mit einer Linse in der angeführten Weise, sind von FRAUNHOFER mit vielem Eifer und Erfolg studirt worden. Die merkwürdigsten dieser Erscheinungen sind diejenigen, welche durch ein feines Gitter, wie es entsteht, wenn man einen feinen Faden zwischen zwei parallelen Schrauben von gleichem Gange ausspannt, hervorgebracht werden. Wenn ein solches Gitter vor das Objektivglas eines Teleskops gesetzt wird, und man nach einem schmalen Spalt, dessen Länge der Fäden parallel geht, sieht, so ist das direkte Bild des Spalts auf jeder Seite durch eine Folge von lebhaft gefärbten Diffraktionsbildern besetzt, welche mit ihrer Entfernung von der Mitte an Breite zu- und an Helligkeit abnehmen. Das erste Paar von Spektren ist von dem mittleren Bilde durch einen völlig dunkeln Raum getrennt, und ein ähnlicher solcher findet sich zwischen dem ersten und zweiten Paar. FRAUNHOFER bemerkte unter günstigen Umständen 13 solcher Spektren auf jeder Seite des mittleren Bildes. Er mass mit grosser Genauigkeit die Winkelabweichungen der Strahlen einer jeden Farbe von der Axe, und fand, dass die experimentellen Gesetze, welche er so ableitete, auf das Vollständigste mit den Resultaten der Lehre von der Interferenz übereinstimmten[3]). Die Resul-

---

1) (*On Light*. 766. POGGEND. Ann. XXIIII. p. 281.)

2) AMICI hat ebenfalls einige Phänomene derselben Art bekannt gemacht. Siehe *Edinb. Journal of Science, v. IV p.* 306.

3) Die Winkelabweichung ϑ_n irgend eines Strahles von der Axe wird durch die Formel

tate sind dieselben, sowohl der Theorie, als dem Versuche nach, wenn die Reflexion von gestreiften Flächen geschieht [1]).

Die optischen Phänomene mit Gittern sind in mancher Hinsicht interessant. Die Erscheinung von Spektren auf den Seiten, welche bloss durch Auffangen eines Theiles des Lichtes hervorgebracht werden, beweist, dass das Licht wirklich von der Vorderseite der grossen Welle, wo diese auf die Linse trifft, nach allen Richtungen auseinanderfährt, und dass man der Interferenz dieses Lichtes mit dem vom Gitter aufgefangenen den Mangel einer bemerkbaren Wirkung unter gewöhnlichen Umständen zuschreiben muss [2]). Ein anderer sehr bemerkenswerther Umstand bei diesen Phänomenen ist die Reinheit des Lichtes einer jeden einfachen

---

$$\sin \vartheta_n = \frac{n\lambda}{\varepsilon}$$

ausgedrückt, wo n die Ordnung des Spektrums, λ die Länge einer Undulation, und ε den Abstand der 2 Fäden bezeichnet. Den Werth ε erhält man mit grosser Genauigkeit, so dass das Maass der Winkelabweichungen der Strahlen jeder einfachen Farbe die genauste Angabe zur Bestimmung der Länge ihrer Wellen liefert. Fraunhofer hat so die Längen der Wellen, den sieben vorzüglichsten festen Linien im Spektrum entsprechend berechnet, und die Werthe, welche sich ergaben, sind vielleicht die genauesten optischen Constanten, welche wir besitzen. Es ist eine merkwürdige Folgerung aus dem oben gegebenen Ausdruck, dass wenn ε kleiner ist als λ, der Winkel ϑ_n imaginär wird. In diesem Falle kann es also kein farbiges Spektrum geben, und es folgt, dass Risse oder Ungleichheiten auf einer polirten Fläche, deren Intervall kleiner ist, als eine Wellenlänge, die regelmässige Reflexion und Refraktion nicht stören.

1) Fraunhofer's Untersuchungen über Diffraktion stehen in den Abhandlungen der Baierschen Akademie der Wissenschaften Th. VIII. Eine sehr vollständige Darlegung derselben findet sich in der *Edinburgh Encyclopaedia*, Art. Optik, und in John Herschel's Werke: „Vom Licht," *Encyc. Metrop.* (Auch in Gehler's physik. Wörterbuch V. 2. Abth. p. 728. ff.) d. Ü.)

2) *Airy's Math. Tracts. p.* 331.

Farbe, welche so bedeutend ist, dass man die festen Linien im Spektrum unterscheiden kann[1]). Die Entfernungen dieser Linien im Spektrum sind stets einander proportional, woraus auch die beugende Substanz bestehen mag, während das Verhältniss ihrer Intervalle, oder die Breiten der farbigen Räume, welche im Spektrum durch Refraktion gebildet werden, sich mit der Natur des Prismas ändern. Diese Thatsache scheint gegen die NEWTON'sche Inflexionstheorie entscheidend, wonach Inflexion und Refraktion auf dieselbe Ursache zurückgeführt werden.

Die analytische Untersuchung des Problems der Diffraktion in den zuletzt erwähnten Fällen, nämlich wo eine Linse vor die Oeffnung gestellt ist, und die Intensität des Lichtes an irgend einem Punkte einer parallelen, durch den Brennpunkt gehenden Ebene gesucht wird, ist weit weniger schwierig, als in den meisten andern Fällen. Der allgemeine Ausdruck für die Ortsveränderung wird auf einmal nach einem der Variablen integrirt, und in vielen Fällen kann das vollständige Integral genau gefunden werden. AIRY hat in seiner werthvollen Abhandlung über die Undulationstheorie[2]) eine Lösung dieses Problems gegeben, und indem er sie auf das zuletzt erwähnte Phänomen anwendete, alle von FRAUNHOFER beobachteten Erscheinungen daraus hergeleitet. Die merkwürdige, von JOHN HERSCHEL beobachtete Erscheinung des sechsstrahligen Sternes, wenn eine dreieckige Blendung vor das Objectivglas eines Teleskopes gestellt wurde, ist ebenfalls als ein anderer Fall desselben Problems dargelegt worden[3]).

---

1) Nach SCHWERD sind von diesen Linien ohne Fernrohr, mit blossen Augen, durch zwei verbundene Prismen von Kronglas mehr als hundert deutlich sichtbar, wenn nur das Gitter in dem Maasse fein ist, als das Fernrohr vergrössern würde. A. d. Ü.

2) *Math. Tracts. p.* 321 etc.

3) Ganz vor Kurzem erschien: „Die Beugungserscheinungen von SCHWERD, Speyer 1835." Der Verfasser hat FRAUNHOFERS Versuche noch vervielfältigt, und dann alle

Fraunhofer bemerkte, dass dieselben Wirkungen durch Reflexion von gestreiften Flächen hervorgebracht werden, und die Theorie derselben muss auf dieselben Principien zurückgeführt werden, da das von den Flächen zwischen den eingegrabenen Streifen reflektirte Licht auf eine vollkommen analoge Weise interferirt, wie das durch die Oeffnungen der Gitter hindurchgehende. Die von solchen Flächen unter gewöhnlichen Umständen gezeigten Farben beobachteten Boyle und Grimaldi; Young zeigte, dass sie aus dem Princip der Interferenz folgten, und bestimmte das Gesetz ihrer Wiederkehr, welches von der Incidenz abhängt [1]), und David Brewster scheint zuerst beobachtet zu haben, dass die in diesen Fällen vervielfachter Diffraktion gebildeten Spektren an Reinheit dem Sonnenspektrum nahe stehen, wenigstens weit näher, als die gewöhnlichen Diffraktionsstreifen, oder Newton's farbige Ringe. Diese Phänomene zeigen die Oberflächenstruktur unfehlbarer vielleicht, als die stärksten Mikroskope. Zu den wichtigsten und schönsten Beispielen dieser Anwendung der Optik kann man die Analyse der Perlmutterfarben [2]), und die Untersuchung des Baues der Kristalllinse in den Augen der Fische und anderer Thiere zählen, welche David Brewster angestellt hat [3]). Derselbe hat auch eine neue Reihe periodischer Farben beschrieben, welche einige von Barton verfertigte Platten gestreiften Stahles zeigten, und welche in einer Ebene auf einander folgen, die rechtwinklig zu der

---

bekannte Thatsachen, von den einfachsten mit homogenem Lichte sich zeigenden zu den zusammengesetztesten bei weissem Lichte fortgehend, auf die ersten Grundsätze der Undulationstheorie zurückgeführt. Die Theorie, aus welcher zugleich alle Nebenumstände der Fakta folgen, und welche mit den genauesten Erfahrungsresultaten stimmt, ist durch graphische, den Sinn der Analysis mehr veranschaulichende Darstellungen sehr erfolgreich verbunden. A. d. Ü.

1) *„On the Theory of Light and Colours,"* *Phil. Trans.* 1801.

2) *Phil. Trans.* 1814.

3) *Ibid.* 1833.

steht, in welcher die gewöhnlichen Spektra gebildet werden[1]). Die Theorie dieses Phänomens besitzen wir noch nicht. Bei der von AIRY gegebenen Lösung des analogen Problems ist eine periodische Aenderung der Intensität des Lichtes in der Richtung der Oeffnungen des Gitters wirklich bemerkt, aber man sieht leicht ein, dass sie die zuletzt erwähnten Thatsachen nicht erklärt.

IV. Farben dünner Blättchen.

Die frühesten bekannten Beobachtungen, bei welchen die Farben dünner Blättchen zum Gegenstande experimenteller Forschung gemacht wurden, sind die von BOYLE[2]). Dieser fleissige Beobachter bemerkte, dass die meisten durchsichtigen Substanzen mit reflektirtem Lichte Farbe zeigten, wenn ihre Dicke hinreichend vermindert war, und dass diese Färbungen sich an ein und derselben Substanz änderten, und daher nicht wesentlich von ihrer chemischen Beschaffenheit abhingen. BOYLE's Beobachtungen wurden an Luftblasen von verschiedenen Flüssigkeiten gemacht, und es gelang ihm sogar, Glas hinlänglich dünn auszublasen, so dass es ähnliche Erscheinungen zeigte.

Die lebhaften und wechselnden Farben einer Seifenblase erregten auch HOOKE's Aufmerksamkeit[3]), aber die wichtigsten Beobachtungen dieses Naturforschers, welche im Zusammenhange mit den Erscheinungen bei dünnen Blättchen stehen, sind die in seiner *Micrographia* aufbewahrten, welche 1665 herauskam. In diesem Werke zeigt er, dass die Farben von Glimmerblättchen von der Dicke derselben abhängig sind, und nur zum Vorschein kommen, wenn

---

1) *Phil. Trans.* 1829.
2) *Experiments and Observations upon Colours.* 1663.
3) *BIRCH's History of the Royal Society, vol. III. p.* 29.

ihre Dicke innerhalb gewisser Grenzen liegt, dass, wenn die von einer Platte gezeigte Färbung gleichförmig auf ihrer ganzen Fläche ist, die Platte auch gleichförmig dick ist; und dass die von zwei über einander liegenden Platten gezeigte Farbe verschieden ist von der, welche jede für sich zeigt. HOOKE hat auch das Verdienst, die Phänomene dünner Blättchen in der instruktiven Form hervorgebracht zu haben, in welcher sie seitdem studirt sind, nämlich dadurch, dass er zwei Objectivgläser mit einander in Berührung brachte, und er fand, dass jede durchsichtige Flüssigkeit, welche zwischen die Linsen gebracht wurde, wie die Luft eine Folge von Farben hervorbrachte, so jedoch, dass die Farben um so lebhafter waren, je mehr das Brechungsvermögen des Blättchens von dem des Glases, zwischen welches es eingeschlossen war, abwich.

Bald darauf wurde NEWTON's Aufmerksamkeit auf denselben Gegenstand gerichtet, und seine Untersuchungen, welche mit der vollständigen Entdeckung der Gesetze dieser Erscheinung endeten, werden immer als ein Muster experimenteller Forschung angesehen werden. Wenn eine convexe Glaslinse, wie es von HOOKE geschah, auf eine ebene Fläche von derselben Masse gelegt wird, so liegen die Streifen ein und derselben Farbe rings um den Punkt der grösten Annäherung beider Flächen, in concentrischen Kreisen, und die Durchmesser dieser Kreise werden sich offenbar wie die Quadratwurzeln aus den Dicken der Luftschichten an den Punkten, wo sie sich seigen, verhalten. Um die Relation zwischen der Farbe und der Dicke zu untersuchen, war nun nichts nöthig, als die Durchmesser dieser Ringe in den verschiedenen Arten von einfachem Lichte zu messen, und indem NEWTON ähnliche Messungen anstellte, wenn die übrigen Umstände der Phänomene verändert wurden, leitete er ihre Gesetze ab, welche von der Substanz der reflektirenden Platte und von der Schiefe des einfallenden Lichtbündels abhingen. Ausserdem bemerkte NEWTON, dass es ein zweites, durch Transmission gebildetes Ringsystem gäbe.

Man fand, dass diese Ringe denselben Gesetzen folgten, mit der merkwürdigen Ausnahme, dass die bei irgend einer besondern Dicke der Platte durch Transmission gebildete Farbe stets die complementäre zu der bei derselben Dicke durch Reflexion entstandenen sei; so dass in homogenem Lichte sich die hellen Ringe beim Hindurchgehen stets in derselben Entfernung vom Mittelpunkte fanden, als die entsprechenden dunkeln bei der Reflexion.

Die Beobachtungen von MARIOTTE [1]), MAZEAS [2]) und DUTOUR [3]) haben zu den von NEWTON entdeckten Gesetzen nichts Wesentliches hinzugebracht. Die meisten dieser Beobachtungen bezogen sich auf Farben, welche die zwischen zwei ebenen Gläsern eingeschlossene Luftschicht zeigte, und daher unter Umständen der Analyse des Phänomens weit weniger günstig sind, als die von NEWTON ausgewählten. Die interessantesten unter den von MAZEAS mitgetheilten Thatsachen sind vielleicht die Wirkungen, welche die Anwendung von Wärme auf das Glas hervorbringt, indem nämlich die Farben nach den Rändern der Platten zurückgehen, und die Streifen an Breite abnehmen, wenn die Temperatur erhöht wird. MAZEAS fand auch, dass bei dem Phänomen keine merkliche Aenderung vor sich ging, wenn die Luft vermittelst der Luftpumpe fortgeschafft war.

Bei DUTOUR's Untersuchungen wurden die durch Reflexion und Transmission erzeugten Färbungen zu gleicher Zeit beobachtet, indem die Letzteren von der unteren Fläche des unteren Glases reflektirt wurden, und durch beide Gläser hindurch zum Auge zurückkamen. Diese letztere Reihe von Ringen wird bestimmter, wenn man den Schatten eines undurchsichtigen Körpers über die obere Fläche führt. Auf diese Weise beobachtete WILLIAM HERSCHEL das Phänomen und fand, dass noch andere Ringsysteme sichtbar wurden,

1) *Traité de la lumière et des couleurs.*
2) *Mémoires presentés, tom.* II.
3) *Ibid. tom.* IV, V, VI.

wenn man die Anzahl der reflektirenden Flächen vergrösserte. WILLIAM HERSCHEL bemerkte ferner, das das erste reflektirte System hervorgebracht wurde, wenn eine Linse auf einen metallischen Reflektor gelegt wurde, und er sagt, in diesem Falle müsse man sich vorstellen, das Transmissions-System werde vom Metall absorbirt. Er beschreibt ferner ein merkwürdiges System regenbogenartiger farbiger Streifen auf der Grenze totaler Reflexion, wenn ein Prisma in Berührung mit einer ebenen Fläche gebracht wird [1]). Die Analyse dieses Phänomens hat JOHN HERSCHEL in seinem Werke über das Licht gegeben [2]).

Zunächst machen nun ARAGO's wichtige Entdeckungen darauf Anspruch berücksichtigt zu werden. Er bemerkte, als er die Ringe durch einen Kalkspathrhombus betrachtete, dessen Hauptschnitt parallel oder senkrecht zur Einfallsebene stand, dass die Intensität des Lichtes bei einem der Bilder sich mit dem Einfallswinkel änderte, und dass es völlig verschwand, wenn die Strahlen einen Winkel von 35° mit der Oberfläche machten. Er bemerkte ferner, dass dasselbe Bild bei demselben Winkel verschwand, die Ringe mochten durch Reflexion oder durch Transmission gebildet sein. Es war also das hindurchgelassene sowohl, als das reflektirte Licht der Ringe völlig in der Einfallsebene polarisirt, und zwar unter dem gewöhnlichen Winkel für Glas. ARAGO hat ferner gezeigt, dass die Farben der von reflektirtem und hindurchgegangenem Lichte gebildeten Ringe nicht nur complementär seien, sondern dass sie auch genau dieselbe Intensität haben; denn wenn beide Systeme über einander gelegt werden, so neutralisiren sie einander vollständig.

Das merkwürdigste jedoch unter den von ARAGO erhaltenen Resultaten betrifft die von einem zwischen einer Glaslinse

---

1) *„Experiments for investigating the Cause of the coloured Rings,“ etc. Phil. Trans,* 1807, 1809, 1810.
2) Artikel 641, 642.
3) *„Sur les couleurs des lames minces,“ Mémoires d'Arcueil, tom.* III.

und einem metallischen Reflektor eingeschlossenen Luftschicht gebildeten Ringe. Wenn diese auf die bereits angeführte Weise betrachtet wurden, so verschwand eins der Bilder, wie im vorigen Falle, beim Polarisationswinkel des Glases; wenn sie sichtbar waren, zeigten sie bei Winkeln über und unter dem Polarisationswinkel, einen merkwürdigen Gegensatz. Wenn der Einfallswinkel kleiner war, als dieser, so waren beide Bilder, durch den doppelt brechenden Krystall betrachtet, nur an Intensität verschieden, die Dimensionen und Farben der Ringe waren dieselben. Bei einem Winkel jedoch, der grösser als der Polarisationswinkel war, hatten die Ringe in beiden Bildern complementäre Farben, so dass, wenn in dem einen die Reihenfolge von einem schwarzen Mittelpunkt anfing, sie im andern mit einem weissen begann. Ebenso waren die Dimensionen der Ringe ein und derselben Ordnung in beiden Bildern verschieden. Aehnliche Phänomene zeigten sich, wenn die dünne Schicht eine Dichtigkeit hatte, welche zwischen der der beiden Substanzen stand, die sie enthielten. Ich werde später Gelegenheit haben, mich auf Airy's Beobachtungen und Deduktionen, welche mit diesen Phänomenen in Zusammenhang stehen, zu beziehen.

Wenn der metallische Reflektor schwach angelaufen war, so sah man mit blossem Auge ein zweites Ringsystem. Die Bildung dieser Ringe hing von dem an der Oberfläche des Metalles unregelmässig verstreuten Lichte ab, und sie wurden sichtbar, welche Stellung auch das Auge gegen das einfallende Licht haben mochte. Ihre Färbungen waren die complementären zu denen der regelmässigen Reihen.

Man sah bald, dass die Phänomene der dünnen Blättchen mit einigen neuen und Grundeigenschaften des Lichtes [1]) in engem Zusammenhange stehen, und dass alle Theo-

---

1) Wir haben nicht nöthig, die Theorien William Herschel's und Parrot's anzuführen, in welchen die Gesetze dünner Blättchen auf die der Reflexion und Refrak-

rien des Lichtes nach ihrer Anwendbarkeit auf diese Phänomene beurtheilt werden müssen. Zur Erklärung derselben erfand Newton, wie wir bereits sagten, seine bekannte Lehre der „Anwandlung des leichteren Durchgangs und leichterer Zurückwerfung," eine Lehre, welche für immer eine der ersten Stellen in der Geschichte der Naturforschung einnehmen wird. Ihre Anwendung ist einleuchtend. Der Strahl hat die Anwandlung des leichteren Durchganges, wenn er durch die erste Fläche geht; dieser folgt eine Anwandlung leichterer Zurückwerfung, und so abwechselnd. Wenn er bei der zweiten Fläche ankommt, wird er sich dann in einer Anwandlung leichteren Durchganges oder leichterer Zurückwerfung befinden, je nachdem der Zwischenraum zwischen beiden Flächen, oder die Dicke der Schicht von Luft ein gerades oder ungerades Multiplum der Länge der Anwandlung ist. Daraus erklärt sich die Wechselfolge von hellen und dunkeln Ringen in homogenem Lichte, und die arithmetische Progression der Dicke, bei welcher sie sich zeigen, zur Genüge. Die Aenderungen in den Dimensionen der Ringe zu erklären, welche von der Natur des Lichtes abhängig sind, wird die Annahme nothwendig, dass sich die Länge der Anwandlungen mit der Farbe ändert, so dass sie in rothem Lichte am grössesten, im violetten am kleinsten, und von dazwischenliegender Grösse für die Strahlen von dazwischenliegender Brechbarkeit sind. Newton bestimmte die absoluten Längen dieser Anwandlungen für die Strahlen einer jeden einfachen Farbe, und fand, dass sie in einer merkwürdigen numerischen Beziehung zu den Längen der Saiten stehen, welche in Oktaven klingen. Diese Resultate werden noch jetzt als Fundamentalangaben bei optischen Untersuchungen angesehen. Um

---

tion zurückgeführt sind; oder die von Mayer, welcher sie auf die Inflexion zu reduciren versuchte. Keine dieser Theorien hat Anhänger gehabt, und sie sind sämmtlich mit klaren Thatsachen im Widerspruch.

Um die übrigen Gesetze zu erklären, war NEWTON gezwungen, neue Annahmen zu machen, und den Anwandlungen Eigenschaften beizulegen, welche mit jeder physikalischen Erklärung, die von ihnen gegeben worden ist, im Widerspruch zu stehen scheinen. So nahm er zur Erklärung des Schwindens der Ringe mit zunehmender Schiefe des Einfallsstrahles an, dass die Länge der Anwandlungen mit dem Einfallswinkel wachse, und zwar nach einem verwickelten Gesetze. Diese Annahme steht mit der physikalischen Theorie in völligem Widerspruch. Wenn die Anwandlungen durch die Vibrationen des Aethers hervorgebracht werden, welche schneller fortgepflanzt werden, als die Strahlen, und welche abwechselnd ihre fortschreitende Bewegung beschleunigen oder aufhalten, so müssten ihre Längen in ein und demselben Medium auch dieselben bleiben, wie gross auch der Einfallswinkel sei. So viel ich weiss, ist kein Versuch gemacht worden, dieses Gesetz mit MELVILLE's und BIOT's physikalischen Hypothesen zu vereinigen.

Dasselbe kann man von der Aenderung der Dimensionen der Ringe mit der Substanz der reflektirenden Fläche sagen. NEWTON fand, dass wenn ein Tropfen Wasser zwischen die Gläser gebracht wurde, die Ringe sich zusammenzogen, und durch Vergleichung ihrer Durchmesser in Luft und in Wasser fand er, dass die correspondirenden Dicken der Schicht sich wie 4 zu 3, oder umgekehrt wie die Brechungsindices verhalten. Es war daher nothwendig anzunehmen, dass die Längen der Anwandlungen in verschiedenen Medien sich in demselben Verhältniss änderten, und da nach der NEWTON'schen Theorie sich die Brechungsindices wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten, so folgte, dass bei vergrösserter Geschwindigkeit die von dem Strahl in der Zeit zwischen seinen periodischen Zuständen durchlaufenen Räume sich vermindern müssen, und zwar in demselben Verhältniss.

Die von ARAGO und AIRY beobachteten Thatsachen aber scheinen diesen Theil der Emissionstheorie völlig um-

zukehren. Die Ringe, welche von einer zwischen einer Glaslinse und einem metallischen Reflektor eingeschlossenen Luftschicht gebildet werden, verschwinden völlig, wenn das Licht senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirt wird, und der Einfallswinkel zugleich der Polarisationswinkel des Glases ist. Unter diesen Umständen wird kein Licht von der obern Fläche der Schicht reflektirt, aber da es von der unteren in hohem Maasse reflektirt wird, so beweist das Verschwinden der Ringe, dass das von der oberen Fläche reflektirte Licht zu ihrer Bildung wesentlich nothwendig ist. Dass das von der unteren Fläche reflektirte Licht ebenfalls bei ihrer Bildung eine Rolle spielt, ergiebt sich aus den von ARAGO beobachteten Wirkungen, wenn die Metallplatte angelaufen war; und so sind wir zu dem Shhlusse genöthigt, dass diese Phänomene von der Vereinigung und dem gegenseitigen Einfluss der von den beiden Flächen reflektirten Lichtbündel herrühren.

Diese Erklärungsweise der Farben dünner Blättchen wurde von HOOKE, an einer merkwürdigen Stelle in seiner Mikrographie, einige Jahre vorher, als NEWTON diesen Gegenstand aufnahm, angeführt. An dieser Stelle beschreibt er deutlich die Art und Weise, in welcher die Ringe auf einander folgender Ordnungen von dem Intervall der Verzögerung des zweiten „Pulses," oder der zweiten Welle nach der ersten, und daher von der Dicke der Schicht abhängen. Aber er scheint keine bestimmte Idee vom Princip der Interferenz selbst gehabt zu haben, und seine Vorstellung von der Art, auf welche die Farben aus diesem „verdoppelten Puls" hervorgehen, ist ganz falsch. EULER war darauf der erste, welcher versuchte, die Phänomene dünner Blättchen mit der Wellentheorie in Verbindung zu bringen; aber dieser Versuch, wie alle physikalischen Spekulationen dieses grossen Mathematikers, war erfolglos. EULER glaubte nämlich, dass die Farben dünner Blättchen, so wie die natürlichen der Körper, von ausgesendetem, und nicht vom reflektirtem Lichte herrührten. Er nahm an, das auffallende

Licht errege die Vibrationen der obersten Schicht, deren Häufigkeit dann von ihrer Dicke abhing, auf dieselbe Weise, wie die Häufigkeit der Vibrationen der Luftsäule in einer Röhre von ihrer Länge abhängen. Diese Vibrationen sollten wiederum die des Lichtäthers erregen, und so die Empfindung verschiedener Farben hervorbringen, wo denn das Roth den am wenigsten häufigen Schwingungen, und das Violett den häufigsten entspricht [1]).

Die Sache blieb auf diesem ungenügenden Standpunkte bis YOUNG das Gesetz der Interferenz entdeckte. Als dies neue Princip mit HOOKE's Annahme vereinigt wurde, verschwand das ganze Mysterium. YOUNG selbst machte die Anwendung, und alle Grundgesetze der reflektirten Ringe erklärten sich rasch und einfach durch die Interferenz der beiden Theile von Licht, welche von beiden Oberflächen der Schicht reflektirt werden [2]). Bei der Anwendung dieses Principes nahm YOUNG jedoch wahr, dass das Intervall der Verzögerung nicht einfach das war, welches zur Differenz der von beiden Büscheln durchlaufenen Wege gehört, sondern dass man annehmen muss, einer derselben erleide im Augenblick der Reflexion eine Veränderung der Phase, welche eine halbe Undulation beträgt. YOUNG wies deutlich die Uebereinstimmung dieser Wirkung mit mechanischen Principien nach, und durch FRESNEL's complicirtere Untersuchungen ist die Verbindung vollständig festgestellt worden. Wirklich finden beide Reflexionen unter entgegengesetzten Umständen statt, indem einer der Theile von der Oberfläche einer dünneren, und der andere von der eines dichteren Mediums reflektirt wird; und die Gesetze der Zusammendrückung elastischer Körper zeigen, dass die Richtung der schwingenden Bewegung in dem einen Falle durch Reflexion

1) Abhandlungen der Berliner Akademie, 1752. (*Mém. Acad. Berl.* 1752.)

2) *„On the Theorie of Light aud Colours.“ Phil. Trans.* 1802.

umgekehrt werden müsse, während sie im andern unverändert bleibt. YOUNG hatte die Genugthuung, dieses Princip auf eine merkwürdige Weise zu bewähren. Es folgte daraus, dass wenn das dünne Blättchen eine brechende Dichtigkeit hatte, welche zwischen denen der Medien lag, innerhalb welcher es eingeschlossen war, die Gesetze des Phänomens durch die Differenz der Wege allein bestimmt werden würden, da die Reflexion an beiden Flächen von derselben Art ist. YOUNG sagte demnach vorher, dass in diesem Falle die Ringe mit einem weissen Mittelpunkt anfangen müssten, statt mit einem schwarzen, und diese Voraussagung wurde bald nachher durch den Versuch bestätigt [1]).

Bei hindurchgegangenem Lichte werden die Ringe nach der Wellentheorie durch die Interferenz des direkten Lichtes mit dem erklärt welches innerhalb der Schicht zwei Reflexionen erlitten hat, und es folgt aus den vorhergehenden Betrachtungen, dass ihre Farben denen von reflektirtem Lichte complementär sein müssen. Dadurch wird zugleich die Ursache der von ARAGO beobachteten Thatsachen klar, dass nämlich das Licht der Ringe von hindurchgehenden Strahlen in der Reflexionsebene polarisirt ist. BIOT hat sich bemüht, diese Thatsache mit der Emissionstheorie zu vereinigen, mit der sie beim ersten Blick in völligem Widerspruch zu stehen scheint. Die Erklärung, welche er von dem Phänomen gegeben hat, wird man, wie ich hoffe, schwerlich für genügend halten [2]).

Die Theorie der dünnen Blättchen kam indessen nicht vollendet aus YOUNG's Händen. Es ist klar, dass die Intensität der beiden von der oberen und unteren Fläche der Schicht reflektirten Lichttheile niemals ein und dieselbe sein kann, da das auf die zweite Fläche auffallende Licht bereits

---

1) „*Account of some Cases of the Production of Colours,*“ *Phil. Trans.* 1802.

2) Siehe BIOT's „*Traité de Physique, tom. IV. p.* 308 *ff*

durch eine partielle Reflexion von der ersten geschwächt ist. Diese beiden Theile können daher einander durch Interferenz nicht vollständig zerstören, und die Intensität des Lichtes sollte also in den dunkeln Ringen niemals Null sein, wie es doch bei homogenem Lichte der Fall zu sein scheint. POISSON war der erste, welcher diesen Mangel der Theorie nachwiess und ihn verbesserte. Es ist nämlich klar, dass innerhalb der Schicht eine unendliche Menge partieller Reflexionen statt finden müssen, und dass bei jeder ein Theil hindurchgeht; also muss die Summe aller dieser Theile, und nicht nur die beiden ersten Grössen der Reihe, bei der Berechnung der Wirkung in Betracht gezogen werden. Indem POISSON das Problem in dieser allgemeineren Gestalt wieder aufnahm, und die eigenen so wie die von YOUNG für die Intensität des Lichtes, wenn es, senkrecht auffallend, reflektirt wurde oder hindurchging, erhaltenen Formeln anwendete, bewies er, dass bei diesem Einfallswinkel, und an Punkten, für welche die Dicke der Schicht ein genaues Multiplum einer halben Wellenlänge ist, die Intensität des hindurchgegangenen und reflektirten Lichtes dieselbe sei, als wenn die Platten dicht aneinander gedrückt, d. h. die begrenzenden Medien in Berührung wären; so dass, wenn diese Media dasselbe Brechungsvermögen besitzen, das reflektirte Licht völlig verschwinden, und das hindurch gegangene dem einfallenden gleich sein muss [1]). FRESNEL zeigte später, dass das Resultat unabhängig von dem Ausdrucke für die Intensität des reflektirten Lichtes sei, und mit Hülfe der von ARAGO entdeckten Eigenschaft, — nämlich, dass das Licht von beiden Flächen einer durchsichtigen Schicht in gleichem Maasse reflektirt wird, dehnte er den Schluss auf

1) *Sur le phénomène des anneaux colorés,“ Ann. de Chimie, tom. XXII. p.* 327. POISSON hat ferner gezeigt, dass völlig schwarze Ringe an Punkten gebildet werden, welche den weissen Ringen im gewöhnlichen Falle entsprechen, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit innerhalb der Platte die mittlere Proportionale zu den Geschwindigkeiten in den begrenzenden Medien ist.

alle Incidenzen aus [1]). Den allgemeinen Ausdruck für die Intensität des Lichtes in irgend einem Theile der durch Reflexion oder durch Transmission des Lichtes gebildeten Ringe, hat AIRY gegeben [2]).

Hiermit wären wir nun zu dem Punkte gekommen, bis zu welchem beide Theorien einander völlig entgegengesetzt sind. Nach beiden wird ein bestimmter Theil von Licht von der ersten Oberfläche reflektirt. Diesem bleibt nach NEWTON's Hypothese seine volle Wirksamkeit, während es nach der Wellentheorie bei gewissen Intervallen, durch Interferenz mit dem andern Bündel, völlig zerstört wird, und die dunklen Ringe sollten in homogenem Lichte absolut schwarz sein. Diese letzte Folgerung scheint mit dem Phänomen übereinzustimmen, während die erstere offenbar mit demselben im Widerspruch steht. FRESNEL hat dies durch einen Versuch klar gezeigt. Ein Prisma wurde auf eine Linse gelegt, deren untere Fläche geschwärzt war, so dass ein Theil der unteren Seite des Prismas über die Linse fortragte. Das von diesem Theile reflektirte Licht musste nach der NEWTON'schen Theorie das der dunkeln Ringe nicht an Intensität übertreffen. Auch der roheste Versuch ist hinreichend zu zeigen, dass die Intensität des Lichtes in beiden Fällen bedeutend verschieden ist, und das beweist, dass die dunklen Ringe nicht (was nach der Annahme der Theorie der Anwandlungen geschieht), von der Unterdrükkung der zweiten Reflexion herrührt [3]).

POTTER wendete eine neue Methode „vergleichender Photometrie" an, um die relativen Lichtintensitäten in den hellen und dunklen Ringen des beim Durchgang entstehenden Systemes zu erklären. Bei dieser Methode wird das Verhältniss der Intensitäten des von beiden ebenen Gläsern reflektirten Lichtes geändert, indem der Einfallswinkel geän-

---

1) *Annales de Chimie, tom. XXIII. p.* 129.

2) *Math. Tracts. p.* 320 *etc.*

3) *Mémoire sur la diffraction, p.* 347. (POGGEND. Ann. XXX. p. 109.)

dert wird, bis es dem Verhältniss des Lichtes in den hellen und dunklen Ringen gleich scheint. Das erstere Verhältniss leitet man darin vermittelst einer empirischen Formel aus dem Einfallswinkel ab. Auf diese Weise fand POTTER, dass das Verhältniss des Lichtes in den Ringen, bei senkrechtem Einfalle, für grünes Licht 2,48 und für rothes 3,49 ist [1]). Das aus den Principien der Wellentheorie hergeleitete Verhältniss ist etwa 1,20 beim Kronglase. Aber abgesehen von der Unsicherheit, welche mit dem empirischen Gesetze verbunden ist, das POTTER als Basis seiner Berechnungen für diese Herleitungen annahm, scheint die photometrische Methode selbst angegriffen werden zu müssen. Man nimmt bei der Anwendung dieser Methode an, dass, wenn die auf eine unregelmässig reflektirende Oberfläche auffallende Lichtmenge gegeben ist, die Menge von reflektirtem Lichte vollkommen und nach allen Richtungen dieselbe sei, der Einfallswinkel mag sein, welcher er wolle. Aber es zeigt sich noch eine Schwierigkeit bei der Anwendung dieser Methode, welche wohl einige Unsicherheit in die Resultate bringt. Wenn leuchtende Gegenstände so klein sind, dass das Auge nicht leicht Theile unterscheiden kann, ist man über absolute Quantität und Intensität des Lichtes ganz im Unsicheren. Ich kann nicht wissen, in wie weit dies bei POTTER's Instrument der Fall gewesen ist; aber es ist merkwürdig, dass wenn wir annehmen, die von den beiden Gläsern reflektirten Lichtmengen seien als die vergleichenden Grössen angewendet worden, die berechneten Resultate sehr genau mit der Theorie stimmen [2]).

Wenn ein Lichtstrahl auf zwei über einander liegende Platten fällt, so finden sich einige der vielen Theile, in welche er durch partielle Reflexion an der Trennungsebene getheilt wird, oft im Zustande des Interferirens, und zeigen Farben. Wenn Licht z. B. durch zwei parallele Platten

---

1) *Lond. et Edinb. Phil. Mag. 3rd. Series, vol, I. p.* 174.
2) Siehe *Phil. Mag. vol. V. p.* 441.

fällt, welche wenig in der Dicke verschieden sind, so wird die entstehende Farbe diejenige sein, welche der Differenz entspricht, und sie wird unabhängig vom Zwischenraum zwischen den Platten sein. Dies Phänomen wurde von Nicholson beobachtet[1]), und Young zeigte, dass es von der Interferenz beider Bündel herrührte, von denen der eine zwei Mal innerhalb des ersten Glases, und der andere zwei Mal innerhalb des zweiten reflektirt wird. David Brewster beobachtete einen ähnlichen Interferenzfall, welcher durch zwei Platten von gleicher Dicke, welche wenig gegen einander geneigt waren, hervorgebracht wurde. In diesen beiden Fällen sind jedoch die interferirenden Bündel gemischt und überstrahlt von dem direkt hindurchgehenden Lichte, und es sind einige Vorsichtsmaassregeln nöthig, um die Fransen sichtbar zu machen. Die Erscheinungen sind weit deutlicher bei dem von beiden Platten reflektirten Lichte, welches zugleich, wegen der Neigung desselben, vom direkten Lichte getrennt ist. Es ist thatsächlich deutlich, dass das direkte Bild eines leuchtenden Gegenstandes, durch die Gläser betrachtet, von einigen seitlichen Bildern begleitet ist, welche durch 2, 4, 6 etc. Reflexionen entstehen. David Brewster beobachtete, dass diese Bilder schön gefärbt seien. Die Streifen sind parallel der Verbindungslinie beider Gläser, und ihre Breite ist um so bedeutender, je geringer die Neigung beider Platten ist[2]). Die Farben im ersten Seitenbilde werden durch Interferenz derjenigen Bündel hervorgebracht, welche zwei Reflexionen erlitten haben, indem der eine innen von der ersten Platte und aussen von der zweiten, der andere dagegen innen von der zweiten und aussen von der ersten reflektirt wird. Die Wege dieser Theile sind nur durch die verschiedenen Neigungen, unter welchen sie die Zwischenräume zwischen beiden Flächen durchlaufen, verschieden. Pouillet beobachtete ein Phänomen dersel-

1) *Nicholson's Journal, vol. II. p.* 312.
2) *Edinb. Trans. vol. VII. p.* 435.

ben Art, wenn eine dicke Glasplatte auf einen Metallspiegel gelegt wird, und zwar in einer Richtung, die fast parallel mit ihrer Oberfläche ist[1]). Die interferirenden Strahlen scheinen in diesem Falle diejenigen zu sein, welche zwei Reflexionen innerhalb der Platte, und eine an der Fläche des Spiegels erlitten haben, indem die Reflexion vom Spiegel bei dem einen Bündel dem andern vorangeht, nnd bei dem andern ihnen folgt. Die Wege zweier solcher Bündel werden wenig von einander verschieden sein, wegen der verschiedenen Schiefe, unter welchen sie durch die Platte gehen.

Die merkwürdigen Erscheinungen, welche Knox beobachtete, als er eine doppelt convexe Linse mit zwei ebenen Gläsern verband, auf jeder Seite derselben eins, hat Young nach denselben Principien erklärt. Zu den bei einer Luftschicht sich zeigenden Ringen kommt in diesem Falle noch ein drittes System concentrischer Ringe hinzu. Die Durchmesser dieser Ringe wachsen in's Unendliche, so wie die der ersten Systeme sich der Gleichheit näheren, bis die Kreise endlich gerade Linien werden, wenn diese einander gleich sind[2]). In der That sieht man leicht ein, dass jeder Ring der Ort derjenigen Punkte ist, für welche die Differenz der Dicke der beiden Luftschichten constant ist, und dass dieser Ort ein Kreis ist, dessen Durchmesser von den Krümmungen der Oberflächen abhängen wird, so wie von dem Abstande der Mittelpunkte der beiden ersten Systeme. Die von „doppelten Platten" gebildeten Ringe sind in anderer Gestalt von Talbot beobachtet worden, nämlich wenn zwei Blättchen dünn ausgeblasenen Glases auf einander gelegt wurden.

Die „Farben dicker Platten" sind vielleicht eine zu ungewöhnliche Erscheinung, als dass man sie als eigene Klasse von optischen Phänomenen studiren sollte; die Aufmerksamkeit, welche man ihnen gezeigt hat, verdanken sie New-

---

1) *Elémens de Physique, tom. II. p.* 478.
2) *Phil. Trans.* 1825. *p.* 161.

TON's Untersuchungen. Bei NEWTON's Versuch fiel ein Lichtstrahl durch eine kleine Oeffnung, und wurde auf einem concav-convexen Spiegel mit parallelen Oberflächen, von denen die hintere versilbert war, aufgefangen. Wenn dann ein Schirm von weissem Papier in den Mittelpunkt des Spiegels gehalten wurde, der mit einem Loche versehen ist, so dass der Strahl hindurch und wieder zurückgehen kann, so wird man eine Folge von farbigen Ringen darauf bemerken, ähnlich den Ringen dünner Blättchen bei hindurchfallendem Lichte, und die Durchmesser der Ringe verhalten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dicken der Spiegel. Der Herzog von CHAULNES bemerkte, dass sich ähnliche Erscheinungen zeigten, wenn statt des gläsernen ein Metallspiegel angewendet würde, und die Strahlen durch eine halb durchsichtige Platte von irgend einer Substanz, oder selbst durch einen, in kurzem Abstand vor dem Spiegel angebrachten Gazeschirm auffielen [1]). W. HERSCHEL fand, dass die Ringe hervorgebracht werden konnten, wenn man vor dem Spiegel ein feines Pulver in die Luft streute [2]), und POUILLET bestätigte es, dass ähnliche Ringe gebildet werden, wenn das auf den Spiegel fallende Licht nur durch eine Oeffnung voe irgend einer Gestalt in einem undurchsichtigen Schirme gegangen ist [3]). Neuerlich beobachteten WHEWELL und QUETELET eine Folge von farbigen Streifen, welche gebildet werden, wenn man das Bild einer Kerze in einem ebenen Glasspiegel betrachtet, während die Kerze in geringer Entfernung vor das Auge gehalten wird, so dass die einfallenden und reflektirten Strahlen einen kleinen Winkel machen können [4]). Indess scheint QUETELET zu glauben, dass dieses Phänomen einer anderen Klasse angehöre, als die zuletzt betrachteten.

---

1) *Mém. Acad. Par.* 1755.
2) *Phil. Trans.* 1807.
3) *Elemens de Physique, tom. II. p.* 476.
4) *Correspondance mathématique, tom. V. p.* 6. und *tom. VI. p.* 1.

Newton erklärte die bei seinen Versuchen beobachteten Farben auf sehr sinnreiche Weise durch die Anwandlungen leichterer Zurückwerfung und leichteren Durchganges desjenigen Theiles von Licht, welcher von der ersten Fläche des Glases nach allen Richtungen verstreut wird, und Biot dehnte die Erklärung auf die analogen, vom Herzog vom Chaulnes beobachteten Phänomene aus. Young zeigte, dass sie durch Interferenz derjenigen beiden Theile von Licht erklärt werden können, welche beim Durchgang und Zurückgang des Strahles durch die brechende Fläche zerstreut werden [1]). Die vollständige Untersuchung, so weit sie sich auf die Dimensionen der auf einander folgenden Ringe bezieht, hat John Herschel gegeben, und man hat gefunden, dass die erhaltene Formel genau mit Newton's Messungen übereinstimmt [2]).

Wenn der Zwischenraum zwischen beiden Gläsern mit verschiedenen Substanzen ausgefüllt wird, wie z. B. Wasser und Luft, oder Wasser und Oel, in höchst fein vertheiltem Zustande, so sind die Lichttheile, welche durch sie hindurchgegangen sind, im Stande zu interferiren, wobei das Intervall der Verzögerung von dem Unterschiede der Geschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien abhängt. Demnach wird man farbige Ringe sehen, wenn ein leuchtender Gegenstand dunch die Gläser betrachtet wird, und die Ringe sind ähnlich denen, welche man gewöhnlich bei hindurchgehendem Lichte wahrnimmt, nur bei weitem grösser. Wenn sich dagegen ein dunkler Gegenstand hinter den Linsen befindet, und das Licht etwas schief auffällt, so ändern die Ringe unmittelbar ihren Charakter, und werden denen des gewöhnlichen reflektirten Systems ähnlich, indem der eine der Theile in diesem Falle reflektirt wird, und daher den Verlust einer halben Undulation erleidet. Diese Erschei-

---

1) *„On the Theory of Light and Colours,"* *Phil Trans.* und *Encycl. Brit.* Art. Chromatik.

2) Vom Licht. Art. 679 ff.

nungen wurden von YOUNG beobachtet und erklärt[1]), und sind von ihm „Farben gemischter Platten" genannt worden. YOUNG bemerkte auch einige ähnliche Farbenerscheinungen in einem uneingeschränkten Medium. So zeigte, wenn der Staub vom *Lycopodium* mit Wasser gemengt wurde, das Gemenge eine grüne Färbung bei direktem Lichte, und eine rothe bei indirektem, und die Farben stiegen in der Reihe, wenn der Unterschied der brechenden Dichtigkeiten durch Hinzufügen von Salzwasser verringert wurde. Das Intervall der Verzögerung hängt auch in diesem Falle von der Grösse des durchsichtigen Theilchens ab[2]).

Beim Schlusse dieses Theiles unsers Gegenstandes möchte ich noch bemerken, dass eine guterdachte Theorie den Erscheinungen angepasst werden, und sie zu erklären scheinen kann, wenn wir nur die Zahl der Postulate vergrössern, und sie damit jeder neuen Klasse von Erscheinungen, welche entdeckt wird, genügt. In gewissem Sinne und bis auf eine gewisse Ausdehnung, kann solche Theorie die richtige genannt werden, in sofern sie bloss der Ausdruck bekannter Gesetze ist. Aber sie ist keine physikalische Theorie, deren wahres Wesen es ist, diese Gesetze mit einander zu verknüpfen, und ihre Abhängigkeit von irgend einem höheren Principe nachzuweisen, — sie ist nur ein Aggregat von besonderen Principien, deren gegenseitige Beziehungen unbekannt sind. So stellten die Cykel und Epicykel des Ptolemäischen Systems treu die augenfälligeren Bewegungen der Himmelskörper dar, aber als die Verfeinerungen der astronomischen Forschung neue Gesetze darlegten, wurden neue Epicykel zu dem Systeme hinzugefügt, bis endlich die Zusammengesetztheit desselben es untauglich machte, ferner als Leiter und Führer zu dienen. Eine ähn-

1) *„Account of some Cases of the Production of Colours" Phil. Trans.* 1802. Der Abbe MAZEAS beschrieb mehrere Thatsachen, welche scheinen auf dieselben Principien zurückgeführt werden zu müssen.

2) *Introduction to Medical Literature*, p. 556.

liche Stellung scheint der gegenwärtige Zustand der Emissionstheorie einzunehmen, und ein solcher Mangel zeigt sich so auffallend in demjenigen Theile der Theorie, welchen wir zuletzt betrachteten, dass einer der Vertheidiger derselben sagt: *Revera illae vices reflexionis et transitus, cum omnibus additamentis fictitiis, mirabiliores adhuc sunt quam phaenomenon ipsum, ad cujus explicationem in usum sunt vocatae*[1]). Dasselbe zeigt sich bei den Haupteintheilungen dieser Wissenschaft, und die verschiedenen Klassen von Phänomenen fliessen nicht aus der Theorie, wie aus einer gemeinschaftlichen Quelle, sondern eine jede hat ihren besonderen und unabhängigen Anfang, und ihre besonderen und unabhängigen Einzelnheiten. In der Wellentheorie dagegen stehen nicht nur die einzelnen Gesetze, sondern die Klassen von Erscheinungen mit einander in Beziehung und zur numerischen Berechnung der Refraktionsgesetze, der verschiedenen Diffraktionserscheinungen, so wie die der dünnen Blättchen, bedürfen wir eines einzigen Resultates der Erfahrung, — der Länge einer Lichtwelle in jedem Medium. Somit liegt klar jener Zusammenhang und jene Harmonie unter den Theilen vor Augen, welche das untrügliche Kennzeichen der Wahrheit sind. Aber so wirksam auch das Gewicht dieser inneren Klarheit zu Gunsten der Wellentheorie ist, so macht sie doch noch mächtigere Ansprüche auf unseren Beitritt. Diese Ansprüche sind auf die Fülle neuer Erscheinungen gegründet, welche sie erklärt, und was wohl zu bemerken ist, nicht auf eine oberflächliche und allgemeine Weise erklärt, sondern in der scharfen Sprache der Analysis, und mit einer Genauigkeit, welche die Verfeinerungen der neuesten Beobachtung nicht im Stande gewesen sind, wankend zu machen. Man kann es zuversichtlich aussprechen, dass sie Eigenschaften besitzt, welche nie eine falsche Theorie besessen hat.

---

1) Mayer über Newton's Farbenringe, Götting. Abh. vol. V. p. 22.

Zweiter Theil.

Polarisirtes Licht.

I. Polarisation. — Querschwingungen.

Bei den verschiedenen Erscheinungen, welche wir bisher beschrieben haben, und welche sich zeigen, wenn ein Lichtstrahl auf die Oberfläche eines neuen Mediums trifft, nahmen wir an, die Richtung und die Intensität der verschiedenen Theile, in welche er zertheilt wird, seien völlig unabhängig von der Art und Weise, auf welche der Strahl die Trennungsebene trifft, wenn die Richtung des Strahles unverändert bleibt. Mit andern Worten, es wurde für gewiss angenommen, dass ein Lichtstrahl in keinem Verhältniss zum Raume stehe, mit Ausnahme dessen, durch welches seine Richtung bestimmt ist; dass rings um diese Richtung seine Eigenschaften auf allen Seiten gleich seien, und dass, wenn man annimmt, der Strahl drehe sich um diese Linie, wie um eine Axe, die Erscheinung dadurch unverändert bliebe.

Huygens beobachtete zuerst, dass dies nicht überall der Fall sei. Bei seinen Untersuchungen über das Gesetz der doppelten Brechung fand er, dass wenn man einen Strahl von Sonnenlicht auf einem Rhombus von Doppelspath auffängt, der nach irgend einer Richtung, eine einzige ausgenommen, gehalten wird, so wird er stets in zwei von gleicher Intensität getheilt. Aber lässt man diese Strahlen auf einen zweiten Rhombus fallen, so wird man mit Ueberraschung bemerken, dass die beiden Theile, in welche jeder derselben

getheilt wird, nicht länger gleiche Intensität behalten: dass ihre relative Helligkeit von der Stellung des zweiten Rhombus gegen den ersten abhängig ist, und dass es unter diesen zwei giebt, bei welchen einer der Strahlen völlig verschwindet.

Aus diesem „wundervollen Phänomen", wie es HUYGENS mit Recht nannte, ergab sich, dass jeder der durch den ersten Rhombus gebrochenen Strahlen Eigenschaften erlangt hatte, welche ihn völlig vom Sonnenlicht unterscheiden. Er hatte in der That Seiten bekommen, und es war klar, dass das Phänomen der Brechung auf irgend eine unbekannte Weise von der Beziehung dieser Seiten zu gewissen Ebenen innerhalb des Krystalles abhängt. NEWTON's Schluss war folgender: „Dies zeigt," sagt er, „eine Kraft oder eine Anlage auf denjenigen Seiten des Strahles, welche dieser Kraft oder Anlage des Krystalles entsprechen und mit ihr sympathisiren, wie die Pole zweier Magnete einander entsprechen."

Diese Vorstellung wurde von MALUS weiter verfolgt, welchen seine mannigfachen und wichtigen Entdeckungen über die Natur und die Gesetze des polarisirten Lichtes mit Recht in die Reihe der Begründer dieses höchst interessanten Zweiges der Wissenschaft stellen. Er nahm an, die Molekeln eines polarisirten Strahles haben alle ihre homologen Seiten nach derselben Richtung gewendet. Er gebrauchte den Ausdruck „Polarisation," um dies Phänomen zu bezeichnen, und verglich diese Wirkung mit der eines Magnetes, welcher die Pole einer Reihe von Nadeln alle nach derselben Seite wendet. BIOT hat die Hypothese von MALUS abgeändert, damit sie auch für die übrigen Lichterscheinungen passend sei, und nahm an, es befinde sich eine Linie oder Axe, ähnlich liegend in jedem Molekel, und in einem polarisirten Strahle seien alle diese Axen nach derselben Richtung gewendet. Die Molekeln könnten sich indess frei um diese Axe drehen, und also verschiedene Stellungen annehmen, je nach den anziehenden oder abstossenden Kräf-

ten, welchen sie ausgesetzt werden, wenn sie die Fläche einer neuen Mediums treffen.

Das Phänomen der Polarisation scheint bedeutend dazu beigetragen zu haben, Newton zur Verwerfnng der von Huygens vorgeschlagenen Theorie zu veranlassen. „Es ist schwer," sagt er, „sich vorzustellen, wie die Lichtstrahlen, obwohl sie keine Körper sind, eine permanente Beschaffenheit auf zwei ihrer Seiten haben können, welche sich nicht auf ihren übrigen Seiten findet, und dies ohne Rücksicht auf ihre Lage im Raume oder auf das Medium, durch welches sie hindurchgehen [1])." „Sind nicht alle Hypothesen irrig," fügt er an einer andern Stelle hinzu, „nach welchen das Licht in einem Drängen oder einer Bewegung besteht, welche durch irgend ein flüssiges Medium fortgepflanzt wird? . . . . Druck oder Bewegungen, welche sich von einem leuchtenden Körper durch ein gleichförmiges Medium verbreiten, müssen nach allen Seiten gleich sein, wogegen sich aus diesem Versuche ergiebt, dass die Lichtstrahlen auf ihren verschiedenen Seiten verschiedene Eigenschaften haben" [2]). Bei diesem Einwurfe scheint Newton sein Augenmerk auf jene Art von wellenförmiger Fortpflanzung gerichtet gehabt zu haben, deren Gesetze er selbst so scharfsinnig entziffert hat. Wenn der Schall sich durch Luft oder Wasser verbreitet, so geschehen die Schwingungen der Theilchen des Fluidums in der Richtung, in welcher die Wellen vorwärts gehen, und wenn die Vibrationen des Aethers, von denen man annimmt, dass sie das Wesen des Lichtes seien, von derselben Art wären, so würde der Einwurf unüberwindlich scheinen. Aber die Sache ändert sich, wenn, wie man jetzt annimmt, die Vibrationen der Aethertheilchen quer (transversal) gegen diejenigen sind, vermöge welcher der Strahl vorwärts geht. Und obgleich wir nicht im

---

1) *Optice, lib. III. Quaes.* 29.
2) *Quaes.* 28.

im Stande sind, irgend Rechenschaft über diese Hypothese zu geben, oder nur zu zeigen, sie könne mit den mechanischen Principien nicht bestehen, so berechtigen uns doch die unzähligen Klassen von Erscheinungen, welche sie erklärt hat, und die auffallende und genaue Weise, auf welche ihre Vorhersagungen sich durch den Versuch bestätigten, anzunehmen, dass, wenn das Gesetz, auf welches wir also so verschiedene und so zusammengesetzte Thatsachen reducirt haben, nicht selbst ein Naturgesetz wäre, es einem solchen wenigstens coordinirt sei, so nämlich, dass wir es als das stellvertretende des wirklich Vorhandenen annehmen, und es unsern Betrachtungen zum Grunde legen, wie wir es mit einem unumstösslichen physikalischen Gesetze thun würden.

Die Hypothese der transversalen Vibrationen wurde zuerst von THOMAS YOUNG aufgestellt, welcher sie durch die Fortpflanzung von Undulationen längs eines gespannten Seiles, das an einem seiner Enden in Bewegung gesetzt wird, zu erläutern versuchte. YOUNG scheint durch die Resultate, zu welchen BREWSTER bei seinen Versuchen über die Gesetze der doppelten Brechung in zweiaxigen Krystallen gelangt war, zu dieser Lehre geführt worden zu sein. Bald darauf wurde dieses Princip über den Rang einer blossen Hypothese erhoben, und man zeigte, dass es eine nothwendige Folgerung der Interferenzgesetze des polarisirten Lichtes sei, wenn man durchgängig die Wellentheorie annähme. Wirklich folgt aus den Gesetzen der Zusammensetzung von Vibrationen, dass die Intensität des Lichtes, welches durch Vereinigung zweier entgegengesetzt polarisirten Strahlen entsteht, constant sein werde, und unabhängig von der Phase (wie es bei den experimentellen Untersuchungen ARAGO's und FRESNEL's bewiesen der Fall war) nur in dem Falle, wenn die Vibrationen senkrecht gegen die Welle verschwindend sind[1]). Aus derselben Untersuchung ergiebt

---

1) BRANDES zeigt in GEHLER's physik. Wörterbuch

sich, dass die Schwingungen entweder parallel oder senkrecht gegen die Polarisationsebene statt finden. Was die Interferenzerscheinungen betrifft, so ist es gleichgültig, welcher von beiden Fällen als der richtige angenommen wird. Aber die Theorie der Querschwingungen selbst führt, wenn man sie auf die Gesetze der doppelten Brechung anwendet, zu dem Schlusse, dass die Schwingungen, welche den gewöhnlichen Strahl in einaxigen Krystallen ausmachen, senkrecht gegen den Hauptschnitt geschehen, und da dieser die Polarisationsebene desselben ist, so schliesst FRESNEL, die Schwingungen des polarisirten Strahles geschähen auf der Oberfläche der Welle, und senkrecht gegen die Polarisationsebene [1]).

Das Princip der Querschwingungen, welches also aus den Interferenzerscheinungen des polarisirten Lichtes hergeleitet ist, lässt sich leicht auch auf das gewöhnliche oder unpolarisirte Licht anwenden. Denn wenn ein Strahl solchen Lichtes auf einen doppeltbrechenden Krystall fällt, so wird er in zwei polarisirte Bündel getheilt, von welchen keiner, wie sich aus dem Vorigen ergiebt, Vibrationen enthalten kann, welche senkrecht gegen die Oberfläche der Welle statt finden. Wenn sich nun dennoch deren im einfallenden Strahle fänden, so würden sie durch die Refraktion zerstört werden, und die Folge davon wäre ein Verlust an lebendiger Kraft, und folglich eine Verringerung der Intensität der Lichtes; mit anderen Worten: die Summe der Intensitäten der beiden gebrochenen Bündel würde geringer sein, als die des einfallenden, was der Erfahrung widerspricht. Daher geschehen sowohl im unpolarisirten Lichte, als im polarisirten die Schwingungen nur auf der Oberfläche der Wellen, und wir müssen uns vorstellen, dass solches Licht aus einer schnellen Folge von Wellensysteme bestehe,

---

VI. 1. Abth. p. 358, dass das ganze Princip nicht zureichend ist. A. d. Ü.

1) *„Mémoire sur la double refraction."* *Mém. Inst. tom. VII.* (POGGEND. Ann. XXIII. p. 420 ff.)

welche in jeder möglichen Ebene polarisirt sind, die durch die Normale auf die Vorderseite der Welle geht. Das Phänomen der Polarisation besteht nun, nach dieser Hypothese, ganz einfach in der Beschränkung der Vibrationen auf zwei Arten, in zwei auf einander rechtwinkligen Richtungen, und in der daraus folgenden Trennung der beiden Wellensysteme, welche so entstanden sind.

Die irrigen Ansichten der Mathematiker über diesen Gegenstand rühren, nach FRESNEL, von den unvollkommenen physikalischen Vorstellungen her, welche sie zur Grundlage ihres Räsonnements gemacht haben. Man hat sich elastische Fluida als aus Theilchen gebildet vorgestellt, welche mit einander in Berührung sind, und sie nur der Verdichtung und Verdünnung fähig gehalten, und demgemäss hat man sich gedacht, die beschleunigenden Kräfte rührten einzig und allein von der Differenz zwischen den Dichtigkeiten der auf einander folgenden Schalen oder Hüllen des Fluidums her. In dem Falle ist es offenbar, dass wenn irgend eine Reihe von Theilchen in der Richtung der Verbindungslinie aus seiner Stelle gebracht wird, diese Reihe auf die nächstfolgende stossen wird, und dass die Bewegung durch keine elastische Kraft einen Widerstand finden wird. Aber wenn wir diese Körper betrachten, wie sie wirklich sind, bestehend aus Molekeln und getrennt durch Zwischenräume, welche wahrscheinlich im Vergleich mit ihrer Grösse beträchtlich sind, und auf einander nach demselben Gesetze einwirkend, das sich mit der Entfernung ändert, so stellt sich die ganze Frage anders. Wenn irgend eine Reihe oder Linie solcher Molekeln auf ähnliche Weise verrückt wird, und zwar um einen Raum, welcher im Vergleich mit den trennenden Intervallen klein ist, so werden die Molekeln der nächstfolgenden Reihe nach derselben Richtung durch die Kräfte fortbewegt werden, welche so bei veränderter Entfernung hervorgerufen werden, so dass die Schwingungen der Theilchen, welche die erste Reihe bilden, denen der zweiten mitgetheilt werden, und so wird die schwingende

Bewegung sich in einer Richtung fortpflanzen, welche senkrecht zu der ist, in welcher sie selbst statt findet [1]). Die Schnelligkeit der Fortpflanzung wird von der Grösse der durch die Ortsveränderung entwickelten Kraft abhängen. Um das Faktum zu erklären, dass keine merklichen Vibrationen in einer gegen die Welle normalen Richtung statt finden, haben wir nur nöthig anzunehmen, die Repulsionskraft zwischen den Molekeln sei sehr gross, oder der Widerstand gegen die Zusammendrückung sehr beträchtlich; denn man wird einsehen, dass in diesem Falle die Kraft, welche der Annäherung zweier Schichten des Fluidums Widerstand leistet, weit grösser ist, als diejenige, welche sich ihrem Schwanken gegen einander widersetzt. FRESNEL's Ansichten über diesen Gegenstand enthält eine kurze Abhandlung: *Considérations mécaniques sur la polarisation de la lumière* [2]), und seine berühmte Abhandlung über die doppelte Brechung [3]).

Die Lehre von den Querschwingungen ist indess nicht ohne grossen Widerspruch aufgenommen worden, und bis heute ist die Meinung der mathematischen Welt über diesen Gegenstand keineswegs völlig im Klaren. In einer Abhandlung über die Fortpflanzung der Bewegung in elastischen Fluiden, welche POISSON 1823 in der Akademie der Wissenschaften las, kam er zu dem Schlusse, dass die schwingenden Bewegungen der Theilchen zuletzt senkrecht gegen die Welle würden, welche Richtung auch die ursprüngliche Störung gehabt haben mag [4]). FRESNEL's

---

1) Das Vorhandensein von Querschwingungen hat sich bei andern Fällen schwingender Bewegung vollständig bestätigt. SAVART und WHEATSTONE haben gezeigt, dass in vielen Fällen die Grundbewegungen der Molekeln der Körper, welche den Schall fortpflanzen, transversal gegen die Richtung der Fortpflanzung sind.

2) *Bulletin de la Soc. Philom.* 1824.

3) *Mémoires de l'Institut, tom. VII.* (POGGEND. Annal. XXIII. p. 372.)

4) *Annales de Chimie, tom. XXII.*

Erwiederung darauf war, dass POISSON's, für die Bewegungen elastischer Fluida angewendeten Gleichungen nur eine mathematische Abstraktion seien, welche auf nichts wirklich vorhandenes anwendbar seien; dass diese Fluida als aus in Berührung befindlichen Elementen bestehend angenommen seien, welche der Zusammendrückung in einem Grade fähig sind, der dem ausgeübten Drucke proportional ist; dass diese Hypothese unrichtig sei, und dass sie, obwohl sie mit den statischen Verhältnissen dieser Flüssigkeiten stimmen mag, doch nie zur Entdeckung ihrer dynamischen Gesetze führen werde [1]).

POISSON scheint die ganze Gewalt dieses Einwurfes gefühlt zu haben; denn in seinen Abhandlungen über denselben Gegenstand, welche er 1828 und 1830 in der Akademie las, hat er die ganze Theorie zurückgenommen, und sie auf einer festeren Grundlage aufgebaut. In der ersteren dieser Abhandlungen hat er die Differentialgleichungen für das Gleichgewicht und die Bewegung elastischer Körper gegeben, unter der Voraussetzung, dass diese Körper aus Molekeln bestehen, welche einander nach einer Funktion aus dem Abstande anziehen oder zurückstossen [2]). In der letzteren giebt er das allgemeine Integral dieser Gleichungen, und entwickelt die Gesetze für die Fortpflanzung der Wellen auf eine beträchtliche Entfernung vom Anfangspunkt der Störung [3]). Bei Flüssigkeiten kommt er zu dem Schluss, welchen er früher erhalten hatte, nämlich dass, wenn die Entfernung vom Anfangspunkte der Störung sehr bedeutend ist im Vergleich mit der Länge einer Welle, die Bewegung der Theilchen in irgend einer Flüssigkeit normal ist gegen die Oberfläche der Welle, die anfänglichen Bewegungen mögen sein, welche sie wollen. Indessen nimmt er an, dass die

1) *Annales de Chimie, tom. XXIII.*

2) *„Mémoires sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques,“ Mém. Inst. tom VIII.*

3) *Mémoires sur la propagation du mouvement dans les milieux élastiques,“ Mém. Inst. tom. X.*

Grundgleichungen der Bewegung von Flüssigkeiten, und deshalb auch die aus ihnen hergeleiteten Folgerungen, in dem Falle sehr schneller Bewegungen wahrscheinlich eine Modifikation nöthig machen werden, wie z. B. beim Lichtäther, da man hier mit einem endlichen Zeitintervall zu thun hat, dessen Grösse von der Natur des Fluidums abhängt, und während dessen der Druck nicht nach allen Richtungen ein und derselbe ist. Bei sehr schnellen Bewegungen muss diese Zeit berücksichtigt werden, und als Gleichungen für die Bewegung von Flüssigkeiten werden fernerhin nicht mehr die gelten, welche wir durch D'ALEMBERT's Princip erhalten haben [1]).

POISSON hat ferner gezeigt, dass eine in einem bestimmten Theile eines festen Körpers verursachte Störung zwei Wellen entstehen machen wird, welche sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten verbreiten werden. Er beweist, dass wie auch die anfänglichen Bewegungen der gestörten Theilchen beschaffen gewesen sein mögen, die Vibrationen in einer dieser Wellen endlich radial, oder in der Richtung der fortgepflanzten Bewegung statt finden würden, während die der anderen senkrecht auf jene Richtung oder transversal sind. Die ersten sind von Verdünnungen begleitet, welche den absoluten Geschwindigkeiten der Molekel proportional sind, und die so sich verbreitenden Wellen sind denen ähnlich, welche in Flüssigkeiten vorkommen. Die Querschwingungen dagegen sind nicht von einer Veränderung in der Dichtigkeit des Mediums begleitet. POISSON scheint nicht daran zu denken, dass dieses Resultat die Hypothese von Querschwingungen im ätherischen Fluidum wohl rechtfertigen kann, obwohl er annimmt, dass die dem Aether beigelegten Eigenschaften in gewisser Hinsicht denen eines festen Körpers ähnlich sind.

Die Fortpflanzung von Querschwingungen scheint jetzt als eine nothwendige Folge aus den dynamischen Principien

1) *Annales de Chimie, tom. XLIV.*

durch die vortrefflichen Untersuchungen CAUCHY's begründet zu sein. Ich werde bald Gelegenheit haben, genauer auf die wichtigen Folgerungen zurückzukommen, zu denen dieser Mathematiker gelangt ist, indem er die allgemeinen Gesetze der Fortpflanzung der Bewegung in elastischen Medien auf das Licht anwandte. Für jetzt wird es genügen zu bemerken, dass die Gestalt der Wellenoberfläche, welche er im Laufe seiner Untersuchungen erhielt, eine gekrümmte Fläche von drei Coordinatebenen ist, und dass folglich ein Lichtstrahl beim Eintritt in irgend ein Medium im Allgemeinen in drei Strahlen zertheilt werden wird, in welchen allen die Richtungen der Vibrationen bestimmt sind. Wenn die Elasticität des Aethers in diesem Medium nach allen Richtungen dieselbe ist, so werden diese drei Strahlen ein und dieselbe Richtung haben, und zwei derselben eine gemeinschaftliche Geschwindigkeit. Somit sind sie auf zwei reducirt, ein einzelner und ein doppelter, in der Richtung zusammenfallend, während die Schwingungen des ersteren dieser Richtung parallel, und die des letzteren senkrecht gegen sie sind. Wenn die anfänglichen Vibrationen in diesem Systeme in einer Ebene, welche senkrecht zur Richtung des Strahles steht, beharren, so wird der einzelne Strahl verschwinden, und die Vibrationen der Molekel des doppelten Strahles werden beständig parallel mit der Richtung der anfänglichen Verrückungen bleiben. Dieser Umstand reducirt also die drei Strahlen auf einen, welcher unpolarisirt ist, und da man aus Erfahrung weiss, dass das in Medien der Fall ist, in welchen sich das Licht nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzt, so folgt, dass die Fortpflanzung der Querschwingungen ein nothwendiges Ergebniss der allgemeinen Theorie ist.

Hiermit hat YOUNG's und FRESNEL's Theorie eine möglichst strenge Bestätigung erhalten, und wenn wir die zahlreichen und wichtigen Folgerungen betrachten, welche CAUCHY bei der Entwickelung seiner Analysis geschaffen und bestätigt hat, so ist es kaum möglich zu glauben, dass

bei dieser Lehre eine Täuschung statt finde. Aber es findet ein wichtiger Grundunterschied zwischen CAUCHY's und FRESNEL's Theorie statt, ein Unterschied, welcher die Grenzlinie zu bezeichnen scheint, bis zu welchem wir in diesem Zweige der mathematischen Physik gelangt sind. Nach FRESNEL sind, wie wir bereits bemerkten, die Vibrationen senkrecht gegen die Polarisationsebene, wie es auch gewöhnlich angenommen wird; nach CAUCHY sind sie parallel mit dieser Ebene. Ich bin geneigt zu glauben, dass das Gebiet auf welchem diese Frage zwischen beiden Theorien entschieden werden muss, ihre Anwendung auf die Reflexionsgesetze des polarisirten Lichtes ist, und wenn dem so ist, so scheint schon ein Grund vorhanden zu sein, dass FRESNEL's Hypothese die richtige sei.

II. Reflexion und Refraction des polarisirten Lichtes.

Obwohl das von HUYGENS entdeckte Phänomen das höchste Interesse in Anspruch nimmt, und schon für NEWTON von solcher Wichtigkeit war, dass es ihn zu der Annahme nöthigte, der Lichtstrahl besitze Eigenschaften, welche bis dahin ganz unbekannt waren, so blieb doch das Resultat mehr als hundert Jahre lang ein einzelnes Faktum in der Wissenschaft und die damit verwandten Erscheinungen, die Eigenschaften, welche das Licht in höherem oder geringerem Grade bei fast jeder Modification, welche es erleidet, erlangt, blieben bis zum Anfange unsers Jahrhunderts unerwähnt. 1810 entdeckte MALUS, als er mit seinen experimentellen Untersuchungen über das HUYGENS'sche Gesetz der doppelten Brechung beschäftigt war, die wichtige Thatsache, dass wenn ein Lichtstrahl von einer Glas- oder Wasserfläche unter bestimmten Winkeln reflektirt wird, die reflektirten Strahlen alle Eigenschaften erlangen, von denen man gefunden hat, dass sie einem der durch doppelte Brechung hervorgebrachten Bündel angehören. Fing man ihn

mit einem Rhombus von Doppelspaht auf, so verschwand einer der Bündel, in welche ein Strahl im Allgemeinen hierdurch getheilt wird, bei zwei Lagen des Hauptschnittes gegen die Reflexionsebene, während in den dazwischenliegenden Stellungen diese Bündel alle verschiedenen Grade von Intensität [1]) durchliefen. Dieselben Aenderungen beobachtete man, wenn man ihn einer zweiten Zurückwerfung unterwarf, unter demselben Winkel, unter welchem die Wirkung bei der ersten hervorgebracht war, so dass das zwei Mal reflektirte Licht sein Maximum der Intensität hatte, wenn die zweite Reflexionsebene mit der ersten zusammenfiel, und es völlig verschwand, wenn sie rechtwinklig zu dieser stand, indem in diesem Falle alles Licht zum gebrochenen Bündel verwendet war. Um die Intensität des reflektirten Lichtes, bei irgend einer Stellung der zweiten Reflexionsebene gegen die erste ausdrücken zu können, nahm Malus an, sie ändere sich wie das Quadrat des Cosinus desjenigen Winkels, welchen diese Ebenen mit einander machen [2]). Die Richtigkeit dieses Gesetzes wurde seitdem durch Arago's und Anderer Beobachtungen bestätigt.

Aus diesem Gesetze folgt, dass man sich einen Strahl gewöhnlichen Lichtes als aus zwei polarisirten Strahlen von gleicher Intensität zusammengesetzt denken kann, deren Polarisationsebenen rechtwinklich zu einander stehen; denn wenn ein solcher zusammengesetzter Strahl unter dem Polarisationswinkel auf eine reflektirende Fläche fällt, so wird die Intensität des reflektirten Lichtes constant und unabhängig von der Lage der Reflexionsebene sein. Aber obwohl dieser zusammengesetzte Strahl bis so weit den Charakter des gewöhnlichen oder unpolarisirten Lichtes zeigt, so muss man ihn doch nicht (wie es bei vielen Schriftstellern der Fall zu sein scheint) als den physikalischen Repräsentanten desselben ansehen. Es ergiebt sich nämlich aus

---

1) *Mémoires d'Arcueil, tom. II. p.* 143.
2) *Mémoires d'Arcueil, tom. II. p.* 254.

der Theorie zusammengesetzter Vibrationen, dass zwei Strahlen von gleicher Intensität, rechtwinklig zu einander polarisirt, einen einzigen in Einer Ebene polarisirten Strahl zusammensetzen, wenn die Differenz ihrer Phasen Null oder gleich irgend einem graden Multiplum einer halben Wellenlänge ist, während in den zwischenliegenden Fällen die Polarisation des hervorgehenden Lichtes entweder circular oder elliptisch ist. Was so die Theorie angedeutet hatte, wurde auf das Vollständigste durch einen schönen Versuch von FRESNEL bestätigt.

Im Verfolg seiner Untersuchungen fand MALUS, dass alle übrigen durchsichtigen Substanzen dieselbe Modification auf das reflektirte Licht ausübten, und dass der Einfallswinkel, bei welchem diese Wirkung hervorgebracht wurde, und welchen er den Polarisationswinkel nannte, im Allgemeinen für jede verschiedene Substanz verschieden war. Er bestimmte ferner die Beziehung zwischen den Polarisationswinkeln an der ersten und der zweiten Oberfläche ein und und desselben durchsichtigen Mediums, und fand, dass ihre Sinus sich verhielten wie der Sinus des Einfallswinkels zu dem des Brechungswinkels, so dass, wenn das Medium durch parallele Flächen begrenzt ist, und das Licht unter dem Polarisationswinkel auf die erste fällt, der hindurchgegangene Theil auf die zweite Fläche ebenfalls unter dem Polarisationswinkel dieser auffällt, und das von beiden reflektirte Licht vollständig polarisirt sein wird [1]). MALUS war indess nicht im Stande, irgend einen Zusammenhang zwischen dem

1) *Mémoires d'Arcueil, tom. II. p.* 152. ARAGO hat dasselbe Gesetz auf die partielle Polarisation ausgedehnt, und gefunden, dass die Sinus der Winkel, unter welchen die erste und zweite Oberfläche eines durchsichtigen Mediums das Licht durch Reflexion in einem ungleichen Grade polarisirt, sich zu einander verhalten, wie die Sinus des Einfalls- und des Brechungswinkels, so dass die von den beiden parallelen Oberflächen einer Platte unter irgend einem Einfallswinkel reflektirten Bündel, dieselbe Eigenschaft besitzen, wie polarisirtes Licht.

Polarisationswinkel und den übrigen Eigenschaften der Substanzen aufzufinden, und er schloss, dass das Vermögen, Licht durch Reflexion zu polarisiren, welches verschiedene Körper bei verschiedenen Winkeln besässen, völlig unabhängig von ihren übrigen Wirkungsarten auf das Licht wäre.

Brewster fing bald darauf eine lange Reihe von Untersuchungen an, um die Polarisationswinkel verschieder Media zu bestimmen, und sie durch ein Gesetz in Zusammenhang zu bringen. Diese Untersuchungen schlossen mit der Entdeckung des Gesetzes, vielleicht dem schönsten in dieser ganzen, so interessanten Wissenschaft, dass „die Tangente des Polarisationswinkels gleich dem Brechungsindex ist.“ Wenn man dieses Gesetz in die Sprache der Geometrie übersetzt, so sagt es, „dass, wenn ein Strahl durch Reflexion vollständig polarisirt ist, der Einfallswinkel und Brechungswinkel einander zu einem Rechten ergänzen.“ Dies Gesetz gilt sowohl für die Reflexion von der Oberfläche eines dünneren, als eines dichteren Mediums, und daraus folgt, dass die beiden Polarisationswinkel an der Trennungsebene derselben beiden Medien complementär zu einander sind [1]).

---

1) „*On the Laws which regulate the Polarization of Light by Reflexion from transparent Bodies.*“ *Phil. Trans.* 1815. — A. Seebeck hat dieses Gesetz einer neuen Prüfung unterworfen (Poggend. Ann. XX. p. 27.) und es so genau richtig gefunden, dass die Abweichung des beobachteten Polarisationswinkels von dem berechneten selten über einige Minuten hinausging. Aber die Ungleichheiten, die Brewster beim Glase bemerkt hatte, fand auch er. Brewster schrieb die grossen Abweichungen, welche sich bei verschiedenen Glasstücken finden, einer chemischen Veränderung der Oberfläche des Glases zu, wodurch die bloss von der Einwirkung der Oberfläche abhängende Polarisirung geändert werde, während die Brechung in der Glasmasse ungeändert bleibt. Er glaubte dieses dadurch bestätigt zu finden, dass er an einem Stück Flintglas durch blosse Erwärmung den Polarisationswinkel um 9° veränderte. Seebeck hält indess dafür, dass mehr die mechanische Behandlung Ursache dieser Ungleichheit sei, indem Gläser, die ganz frisch und

Malus bemerkte, dass wenn der Einfallswinkel grösser oder kleiner war, als der Polarisationswinkel, die bereits beschriebenen Eigenschaften nur zum Theil in dem reflektirten Bündel entwickelt waren. Keiner der beiden Bündel, in welche ein solcher Strahl durch einen Doppelspath getheilt wurde, verschwand je vollständig, aber sie änderten ihre Intensität zwischen gewissen Grenzen, welche um so enger waren, je grösser der Unterschied zwischen dem Einfallswinkel und dem Winkel vollkommener Polarisation war. Daraus schloss er natürlicherweise, dass unter diesen Umständen nur ein Theil des reflektirten Bündels die Modifikation erlitten hatte, welcher er den Namen Polarisation gegeben hatte, und dass dieser Theil grösser werde, je mehr sich der Einfallswinkel dem Polarisationswinkel näherte, und dass der übrigbleibende Theil unverändert blieb, oder sich wie gewöhnliches Licht verhielt. Die meisten späteren Forscher folgten Malus in dieser Annahme. Eine abweichende Ansicht des Phänomens der theilweisen Polarisation wurde von Brewster aufgestellt, die ich sogleich anzuführen Gelegenheit haben werde, und er benutzte seine Theorie zur Erklärung eines Phänomens, welches er zuerst beobachtet zu haben scheint, nämlich dass gewöhnliches Licht durch eine hinreichende Menge von Reflexionen unter irgend einem Winkel polarisirt werden kann, wobei die Anzahl von Reflexionen, welche nöthig sind, um die Wirkung hervorzubringen, um so grösser ist, je grösser der Unterschied zwischen dem Einfalls- und dem Polarisationswinkel ist[1]).

Bei der Untersuchung des hindurchgegangenen Bündels fand Malus, dass es zum Theil polarisirt war, und dass seine Polarisationsebene nicht, wie die des reflektirten Bündels, mit der Reflexionsebene zusammenfiel,

---

mit besonderer Sorgfalt polirt waren, immer fast strenge mit dem Brechungsverhältnisse übereinstimmende Polarisationswinkel hatten. (Gehler's physik. Wörterbuch VII. 2te Abth. p. 704.) A. d. U.

1) *Phil. Trans.* 1815.

sondern senkrecht zu ihr stand [1]). Er bemerkte, dass beide so in entgegengesetzten Ebenen polarisirte Lichtstrahlen innig mit einander zusammenhingen, und in einer späteren Abhandlung spricht er von dem Faktum, dass wenn wir durch irgend eine Vorrichtung einen in irgend einer Ebene polarisirten Strahl hervorbringen, zu gleicher Zeit ein anderer in der entgegengesetzten Ebene polarisirter Strahl entsteht. Diese beiden polarisirten Strahlen folgen besonderen Wegen, und ihre Grössen sind stets einander proportional. Der Zusammenhang ist indess noch viel inniger, als es Malus annahm; denn die Mengen von polarisirtem Lichte in dem reflektirten und hindurchgelassenen Bündel sind nicht nur einander proportional, sondern absolut gleich. Dieses merkwürdige Gesetz hat Arago entdeckt.

Wenn ein Strahl, welcher vermittelst des Durchganges durch eine Glasplatte zum Theil polarisirt ist, auf eine zweite Platte unter demselben Winkel fällt, so erleidet der Theil gewöhnlichen Lichtes, welchen er enthält, eine neue Zertheilung, und das geht so fort, die Zahl der Platten mag sein, welche sie wolle. Wenn also diese Zahl hinreichend gross ist, so wird das hindurchgegangene Licht offenbar völlig polarisirt werden, und das ganze Licht wird so in zwei entgegengesetzt polarisirte Bündel getheilt, von denen der eine von dem System von Glasplatten reflektirt, und der andere hindurchgelassen wird. Diese Thatsachen beobachtete schon Malus. Die Gesetze der Erscheinungen sind seitdem genauer von David Brewster erforscht, und er kam zu dem Schluss, dass wenn ein Lichtstrahl nach und nach durch eine beliebige Anzahl paralleler Platten fällt, die Tangente des Winkels, unter welchem die Polarisation des gebrochenen Bündels vollkommen scheint, sich umgekehrt verhält, wie die Anzahl der Platten [2]).

---

1) *Mém. Inst.* 1810.

2) „*On the Polarization of Light by oblique Transmission*" *etc. Phil. Trans.* 1814.

Ich werde nun diese Erscheinungen in Bezug auf die beiden Theorien des Lichtes betrachten.

Newton bewies, dass die Grundgesetze der Reflexion und Refraktion aus der Wirkung anziehender und abstossender Kräfte hergeleitet werden können, welche die Molekel des Körpers auf die des Lichtes ausüben. Die Polarisationsphänomene zeigen jedoch, dass diese Kräfte nach der Lage der Seiten des Strahles gegen die Reflexions- und Refraktionsebene in sehr verschiedenem Grade ausgeübt werden, und wir wollen jetzt die Hülfshypothesen betrachten, welche in der Emissionstheorie nothwendig werden, um diese neuen Thatsachen zu erklären.

Wir erwähnten schon, dass nach Biot's Theorie ein polarisirter Strahl ein solcher ist, in welchem gewisse Axen (sogenannte Polarisationsaxen) sämmtlicher Molekel nach ein und derselben Richtung gewendet sind. Diese Wirkung schreibt er der Einwirkung gewisser Kräfte zu, welche von den Molekeln des Körpers ausgehen. Diese Kräfte nennt Biot polarisirende Kräfte, und er sieht sie als verschieden von den reflektirenden und brechenden Kräften an, obwohl im innigsten Zusammenhang mit diesen stehend. Die Wirkung einer polarisirenden Kraft besteht darin, dass sie den Axen der Molekeln eine Rotation ertheilt, und er nimmt an, dass diejenige, welche dem reflektirten Strahle die Eigenschaft der Polarisation mittheilt, in der Reflexionsebene wirke. Unter dieser Voraussetzung sind wir, da ein Strahl gewöhnlichen Lichtes durch Reflexion polarisirt wird, wenn er unter einem bestimmten Winkel auffällt, zu der Annahme genöthigt, dass unter diesem Winkel die polarisirende Kraft die Polarisationsaxen aller Molekeln wendet, und in die Reflexionsebene bringt, und da dies für alle Molekel des reflektirten Strahles statt findet, so muss man sich eine solche Anordnung der Axen als eine nothwendige Bedingung zur Reflexion bei diesem Einfallswinkel vorstellen.

Man lasse nun einen so polarisirten Strahl unter dem

Polarisationswinkel auf eine zweite reflektirende Fläche fallen, und die Ebene der zweiten Reflexion sei senkrecht gegen die erste; dann sind die Polarisationsaxen der Molekel bei ihrem Auffallen auf die zweite Fläche senkrecht gegen die Reflexionsebene; folglich afficirt die in dieser Ebene wirkende polarisirende Kraft beide Hälften der Axen gleichmässig, und kann sie deshalb nicht in die Reflexionsebene wenden, eine Bedingung, welche wir als nothwendig für die Reflexion unter diesem Winkel angenommen haben. Deshalb wird kein Licht reflektirt. Aber wenn die Ebene der zweiten Reflexion gegen die der ersten unter einem kleineren Winkel als 90° geneigt ist, so wirkt die polarisirende Kraft der zweiten Fläche nicht länger symmetrisch auf beide Hälften der Axen der Molekel; sie kann daher diese Axen so wenden, dass sie mit der Reflexionsebene zusammenfallen, und somit die Molekel der Einwirkung der reflektirenden Kraft unterwerfen. Die Wirkung der polarisirenden Kraft nimmt zu, wie die Neigung der beiden Reflexionsebenen zu einander abnimmt, und folglich nimmt die Anzahl der von der zweiten Fläche reflektirten Molekeln gleichfalls zu.

Aber hier wird es nöthig, eine andere Annahme zu machen. Bei jeder Lage der zweiten Reflexionsebene gegen die erste, die senkrechte ausgenommen, zeigt die Erfahrung, dass ein Theil des Lichtes reflektirt und ein anderer gebrochen wird. Nach dieser Theorie nun folgen einige der Molekel der polarisirenden Kraft, und haben ihre Axen in die Ebene der Reflexion gebracht, während dies mit anderen nicht geschieht. Um diese Verschiedenheit der Wirkung zu erklären, muss irgend eine Verschiedenheit im Zustande der Molekeln selbst vorhanden sein. Biot hilft sich bei seiner Theorie damit, dass er ihnen eine oscillirende Bewegung um ihre Polarisationsaxe beilegt, so dass die Molekeln der polarisirenden Kraft nachgeben oder nicht, je nach der Phase der Oscillation, in welcher sie sich im Augenblicke, in welchem sie die Oberfläche erreichen, befinden.

Die Kraft, welche dem gebrochenen Bündel die Eigenschaft der Polarisation mittheilt, wirkt nach Biot's Annahme ebenfalls in der Einfallsebene, so jedoch, dass ihre Wirkung darin besteht, dass sie die Polarisationsaxen der leuchtenden Molekel in eine gegen diese Ebene senkrechte Ebene wendet. Wenn also ein Lichtstrahl durch die Oberfläche einer Glasplatte unter dem Polarisationswinkel geht, so wird er der Einwirkung zweier Kräfte unterworfen, von denen die eine die Polarisationsaxen der Molekeln in die Einfallsebene, die andere aber sie rechtwinklig gegen diese zu wenden strebt, und die Molekel selbst folgen der einen oder der andern dieser Kräfte, je nach den Phasen ihrer Anwandlungen. Was die Art und Weise betrifft, wie man annehmen kann, dass dies geschehe, so müssen wir deswegen auf Biot's *Traité de Physique*[1]) verweisen. Die ganzen, durch diese beiden Kräfte entgegengesetzt polarisirten Lichtmengen, nimmt Biot als gleich an; aber er glaubt, dass die Kraft, welche das reflektirte Bündel polarisirt, auf eine weit grössere Anzahl Molekeln wirke, als die sind, welche wirklich eine Reflexion erleiden. Diese so in der Einfallsebene polarisirten Molekeln treten zu dem hindurchgehenden Strahl, neutralisiren eine gleich grosse Menge durch Brechung in der entgegengesetzten Ebene polarisirter Molekel, und bilden mit ihnen einen Strahl gewöhnlichen Lichtes. Da nun die ganzen durch beide Kräfte polarisirten Lichtmengen einander gleich sind, so werden die übrigen effektiv polarisirten Strahlen noch gleich sein, in Uebereinstimmung mit dem von Arago entdeckten Gesetze.

Ich habe versucht, Biot's Theorie hier so vollständig darzulegen, als es mir die Grenzen dieses Werkes erlauben, weil mir scheint, als gäben die Menge und die Natur der Hypothesen selbst, welche erforderlich sind, um Rechenschaft von den Polarisationsphänomenen nach der Emissionstheo-

1) Buch VI. Kap. I. Theil IV.

theorie zu geben, einen genügenden Grund gegen dieselbe ab. Aber wenn wir auch alles dies annehmen, in wie weit können wir denn alsdann sagen, dass wir der Erklärung der Erscheinungen nahe sind? Die angenommenen Kräfte und die bekannten Gesetze sind in keinem einzigen Falle durch die sicheren Verfahrungsarten einer mathematischen Deduktion in Verbindung gebracht, und wir sind daher nicht im Stande zu sagen, in wie weit die gegebene Erklärung zureichend ist, selbst nur die allgemeinen Thatsachen wiederzugeben, viel weniger können wir sie numerisch berechnen, und die Resultate mit denen der Beobachtung vergleichen.

Der erste Versuch, die Modifikationen des reflektirten Lichtes mit der Wellentheorie in Zusammenhang zu bringen, wurde von Young gemacht. Dieser scharfsinnige Forscher beschäftigte sich mit der Lösung des Problems der Reflexion bei senkrecht einfallendem Strahl, und zeigte, dass die Intensität des reflektirten Lichtes in diesem Falle durch eine einfache Funktion des Brechungsindex dargestellt werde [1]). Diese Formel fand nachher Poisson abermals, als Resultat einer tieferen Analysis, in einer Abhandlung über die gleichzeitigen Bewegungen zweier sich in Berührung befindenden elastischen Flüssigkeiten, gelesen vor der Franz. Akademie 1817 [2]). In dieser Abhandlung hatte jedoch der Autor nur den Fall der senkrechten Einfallsstrahlen betrachtet, oder das Gesetz der Fortpflanzung einer ebenen Welle, parallel mit der Trennungsfläche beider Medien. In einer späteren Abhandlung von der ich bereits gesprochen habe, und welche er 1823 vor der Akademie las [3]), hat er das Problem allgemein behandelt und die Modifikationen untersucht, welche sowohl in der Intensität, als der Richtung einer Welle oder einer Reihe von Wellen hervorgebracht werden, wenn sie

1) *Encyc. Brit. Supp.* Art. Chromatik.
2) *Mém. Inst. tom. II.*
3) Nur ein Theil dieser Abhandlung ist unter dem Titel: „*Mémoire sur le mouvement de deux fluides élastiques superposés*" *tom. X.* in den *Mémoires de l'Institut* abgedruckt.

aus einer Flüssigkeit in eine andere von derselben Elasticität, aber von einer anderen Dichtigkeit tritt. Die für die Intensität der reflektirten und der gebrochenen Wellen erhaltenen Ausdrücke sind Funktionen des Einfallswinkels, und des Verhältnisses der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Medien. Wenn die Welle auf die Oberfläche des dichteren Mediums trifft, so wird der Ausdruck für die Intensität der reflektirten Welle bei einem gewissen Winkel, dessen Tangente gleich dem Quotienten der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten ist, Null. Unter diesem Winkel, welcher der Winkel vollkommener Polarisation ist, müssen also Gegenstände aufhören, durch reflektirtes Licht sichtbar zu sein, — ein Resultat, welchem alle Erfahrung widerspricht, und welches nur wahr ist, wenn das Licht in einer gegen die Reflexionsebene senkrechten Ebene polarisirt ist. Wenn die Welle von der Oberfläche des dünneren Mediums reflektirt wird, so hat man zwei Ausdrücke für die Intensität, für Einfallswinkel, welche grösser oder kleiner als der Gränzwinkel totaler Reflexion sind; ebenso giebt es in diesem Falle zwei Winkel des Verschwindens. Diese Schlüsse, welche für Schall sowohl als für Licht gelten, genügen, um die physikalische Unbrauchbarkeit der Theorie zu zeigen.

Indess hat die Wellentheorie, wenn sie mit dem Princip der Querschwingungen verbunden wird, die vollständige Lösung des Problems gegeben, welches wir betrachtet haben. Die Eigenthümlichkeit von Fresnel's Geist ist in dieser Theorie scharf ausgeprägt. Unsere unvollkommene Kenntniss der genauen physikalischen Bedingungen bei diesem Problem ist durch kühne, aber höchst wahrscheinliche Annahmen ergänzt; der Sinn der Analysis ist gleichsam anschaulich wiedergegeben, wo die Sprache derselben ihn verliess, und die auf diese Weise scharfsinnig erlangten Schlüsse wurden zuletzt durch Versuche bestätigt, welche so ausgewählt wurden, dass die Natur gezwungen war, für die Richtigkeit oder die Unrichtigkeit der Theorie zu zeugen [1]).

---

1) Fresnel's Reflexionstheorie ist in einer Abhandlung

Es ist klar, dass in beiden Medien die Aetherschichten, welche an der Trennungsfläche anliegen, gleiche Verrückungen parallel dieser Fläche erleiden müssen, da die eine derselben nicht über die andere gleiten kann. Folglich muss die Amplitude der Schwingung, nach einer Richtung parallel mit dieser Fläche zerlegt, in beiden Medien ein und dieselbe sein. Fresnel nimmt an, diese Gleichheit an der Trennungsfläche finde bei jeder Entfernung statt, und damit hatte er eine Relation zwischen den Amplituden der Schwingungen der einfallenden, der reflektirten und der gebrochenen Wellen. Eine zweite Relation zwischen denselben Grössen gab ihm das Gesetz der lebendigen Kraft; aber zur Anwendung desselben ist es nothwendig, die relativen Dichtigkeiten des Aethers in beiden Medien zu kennen. Hier nimmt Fresnel an, die Elasticität des Aethers sei in diesen Medien ein und dieselbe [1]), die Dichtigkeit aber verschieden, und wenn man dies als entschieden annimmt, so folgt, dass die beiden Dichtigkeiten sich zu einander umgekehrt wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten, und dass daher ihr Verhältniss gegeben ist, wenn der Brechungsindex bekannt ist. Die Amplituden der reflektirten und gebrochenen Schwingungen, und daher auch die Intensitäten des Lichtes in beiden Bündeln, erhält man durch einfache Elimination aus den so eben erwähnten Gleichungen.

---

enthalten, welche er 1823 vor der Akademie der Wissenschaften las, betitelt: „*Mémoire sur la loi des modifications que la reflexion imprime à la lumière polarisée.*" Ein unvollständiger Auszug dieser Abhandlung befindet sich in den *Annales de Chimie* 1825. Die Originalabhandlung war verlegt, und man hielt sie eine Zeit lang für verloren; später ist sie indess unter Fourier's Papieren wieder gefunden, und im 11. Bande der Memoiren des Instituts abgedruckt.

1) Fresnel sagt, er habe das Problem der Reflexion nach der allgemeinen Annahme gelöst, dass beide Media sowohl an Elasticität als an Dichtigkeit verschieden sind, bei Strahlen, welche in der Reflexionsebene polarisirt sind, und die sich ergebende Formel sei dieselbe wie die, welche er bereits nach der beschränkteren Hypothese erhalten hatte. *Ann. de Chim. tom. XXIII.*

Die Ausdrücke für die Intensität des Lichtes im reflektirten Strahle sind verschieden, je nachdem das einfallende Licht in der Reflexionsebene, oder in der gegen diese senkrechten polarisirt ist [1]). Die Intensität des Lichtes im letzteren Falle wird Null, wenn die Summe des Einfalls- und Brechungswinkels 90° ist, und somit war die Schwierigkeit gelöst, welche, nach YOUNG's nur drei Jahre früher ausgesprochenen Meinung „wahrscheinlich lange trotz jeder Theorie ungelöst bleiben würde, zur Kränkung der Eitelkeit einer ehrgeizigen Philosophie." Wenn gewöhnliches oder unpolarisirtes Licht daher unter einem Winkel auffällt, dessen Tangente gleich dem Brechungsindex ist, so wird das reflektirte Licht vollständig in der Reflexionsebene polarisirt sein, und BREWSTER's schönes Gesetz ist eine der ersten Früchte von FRESNEL's Theorie. Das merkwürdige Gesetz, welches ARAGO erhielt, ist ebenfalls eine nothwendige Folge aus derselben Formel, und man schliesst leicht, dass die Mengen polarisirten Lichtes im reflektirten und gebrochenen Bündel gleich sind, der Einfallswinkel mag sein, welcher er wolle.

Bei senkrechter Incidenz reduciren sich diese beiden Formeln auf den einfachen von YOUNG und POISSON erhaltenen Ausdruck; und wenn der Einfallswinkel 90° beträgt, oder der Strahl die Oberfläche streift, ist die Intensität des reflektirten Lichtes gleich der des einfallenden, oder es wird das ganze Licht reflektirt, was auch das reflektirende Medium sein mag. Der letztere Schluss hat sich durch die Beobachtung der Streifen bestätigt, welche durch Interferenz des direkten Lichtes mit dem, welches bei einem Einfallswinkel von fast 90° reflektirt wird, entstehen. Der erste dunkle Streif scheint vollkommen schwarz zu sein, und deshalb sind beide Lichter offenbar von gleicher Intensität [2]).

---

1) Diese beiden Formeln wurden zuerst in den *Annales de Chimie* 1821 bekannt gemacht, die zweite ohne Beweis.

2) *„On a New Case of Interference."* *Trans. Royal Irish Academy, vol. XVII.*

Wir besitzen also die Lösung eines Problems, welches lange Zeit den Bemühungen der Experimentatoren spottete, nämlich die Bestimmung des Gesetzes für die Intensität des reflektirten Lichtes in seiner Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Fresnel hat die erhaltenen Formeln nicht mit dem Experiment verglichen, nur bei Arago's beiden Beobachtungen; Bouguer's und Lambert's Beobachtungen ergeben sich als ungenau. Das Resultat der angeführten Vergleichung ist in den *Annales de Chimie* gegeben [1]), und die Uebereinstimmung ist so genügend, als man es bei Beobachtungen dieser Art erwarten kann.

Potter hat unlängst die Intensität des vom Diamanten und Spiessglanz reflektirten Lichtes bei verschiedenem Einfallswinkel untersucht [2]). Die bei diesen Beobachtungen angewendete photometrische Methode bestand in einer Vergleichung des bei irgend einem Einfallswinkel von der zu untersuchenden Substanz reflektirten Lichtes mit dem von einem Stück Kronglas reflektirten, und in der Aenderung des Einfallswinkels für das letztere, bis man bemerkte, dass die Intensitäten gleich waren. Die Intensität des von Kronglas bei verschiedenen Einfallswinkeln reflektirten Lichtes war bereits durch eine ausführliche Reihe von Experimenten bekannt, und aus den Resultaten wurde ein empirisches Gesetz hergeleitet, in welchem die Intensität durch die Ordinate einer rechtwinkligen Hyperbel dargestellt ist, während die dazu gehörige Abscisse der Sinus des Einfallswinkels ist. Diese Formel giebt nun die Intensität des vom Kronglas reflektirten Lichtes, und deshalb, bei correspondirenden Einfallswinkeln auch die der untersuchten Substanz. Potter schliesst auf diese Weise, dass die Intensität des vom Diamanten bei senkrechtem Einfallen reflektirten Lichtes 9,3, und die von Spiessglanz 8,2 ist, wenn die Intensität des einfallenden Lichtes 100 ist. Die

1) *tom. XVII. p.* 190.
2) *Phil. Mag., Ser. III. vol. I. p.* 179, *vol. IV. p.* 6.

aus den Brechungsindices berechneten Intensitäten sind nach YOUNG's, POISSON's und FRESNEL's Formel respektive 18,36 und 13,33. Diese Verschiedenheit der Ergebnisse der Theorie und des Experimentes liegen ohne Zweifel ausserhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler, und wäre dem nicht so, so stimmen doch die von POTTER bei diesen und andern ähnlichen Versuchen erhaltenen Resultate zu genau mit einander überein, um ein Zurückführen dieser Verschiedenheit auf eine solche Quelle zu gestatten. Diese Methode ergiebt sich aber als mindestens ungenau, und man kann nur wünschen, dass einige der neuerlich vorgeschlagenen photometrischen Methoden zur Untersuchung dieses interessanten Gegenstandes angewendet werden möchten.

FRESNEL's Formel giebt uns die Erklärung der merkwürdigen von ARAGO beobachteten Erscheinung, dass nämlich, wenn die NEWTON'schen Ringe zwischen einem Linsenglase und einem metallischen Reflektor gebildet werden, das eine der beiden Bilder, in welche sie durch einen doppeltbrechenden Krystall, dessen Hauptschnitt der Reflexionsebene parallel oder senkrecht gegen dieselbe steht, getheilt werden, seine Beschaffenheit ändert, wenn der Einfallsstrahl unter dem Polarisationswinkel auffällt, indem die Farben dieselben sind, als in dem andern Bilde, wenn der Einfallswinkel kleiner ist, als der Polarisationswinkel, aber complementär zu diesen, wenn er grösser ist. Wenn das einfallende Licht[1]) senkrecht gegen die Reflexionsebene polarisirt ist, so ändert wirklich die Amplitude der reflektirten Schwingung (welche bei dem Winkel, dessen Tangente gleich dem Brechungsindex ist, Null wird), ihr Zeichen, indem sie durch Null geht, so dass sie negativ ist, wenn der Einfallswinkel kleiner, als dieser ist, und positiv, wenn er grösser ist. Wenn folglich die beim Fleck im Mittelpunkt vom Glase reflektirte Welle im ersteren Falle mit der vom Me-

1) Die Wirkung ist dieselbe, das Licht mag vor der Reflexion polarisirt werden, oder nach derselben.

tall reflektirten in völliger Discordanz ist, so wird sie im letzteren Falle in völliger Accordanz sein, und der Mittelpunkt, welcher vorher schwarz war, wird nun **weiss** sein. Aus demselben Grunde wird das ganze System dem früheren complementär sein. Airy hatte aus Fresnel's Ausdrücken dies Resultat vorhergesagt, und er fand es nachher durch den Versuch bestätigt [1]), wahrscheinlich ohne etwas von den von Arago beobachteten Thatsachen zu wissen. Eine ähnliche Bestätigung derselben Principien kann man bei Fresnel's Experiment erhalten, wenn man einen metallischen Reflektor mit einem gläsernen combinirt. Da das Licht senkrecht gegen die Reflexionsebene polarisirt ist, so wird die Mitte **weiss** sein, wenn der Einfallswinkel kleiner ist, als der Polarisationswinkel des Glases; beim Polarisationswinkel werden die Interferenzstreifen völlig verschwinden, und unter diesem Einfallswinkel werden sie mit einer **dunklen** Mitte wieder erscheinen, statt mit einer weissen. Diese Beobachtungsmethode möchte ganz besonders zur Untersuchung der durch metallische Reflexion bei verschiedenen Einfallswinkeln bewirkten Phasenveränderung geeignet sein.

Denselben Betrachtungen wie oben zufolge vermuthete Airy, dass wenn Newton's Ringe zwischen zwei durchsichtigen Substanzen von verschiedenem Brechungsvermögen gebildet werden (wobei das Licht senkrecht gegen die Einfallsebene polarisirt ist), die Ringe eine schwarze Mitte haben müssen, wenn der Einfallswinkel kleiner war, als der Polarisationswinkel der schwächer brechenden Substanz, oder grösser, als der der stärker brechenden; während sie ein weisse Mitte zeigen würden, wenn er zwischen diesen Winkeln läge; es haben nämlich die Schwingungen der von beiden Oberflächen reflektirten Wellen im ersteren Falle entgegengesetzte, im letzteren dieselben Zeichen. Alle diese Ver-

---

1) „*On a Remarkable Modification of Newton's Rings.*" *Cambridge Trans.* 1832. (Poggend. Ann. XXVI. p. 123.)

muthungen wurden vollständig durch das Experiment bestätigt[1]). Die von Airy zu diesen Beobachtungen ausgewählten Substanzen waren Scheibenglas und Diamant, beide von sehr verschiedenem Brechungsvermögen. Er hat während seiner Versuche gewisse Eigenthümlichkeiten an den Erscheinungen wahrgenommen, aus welchen er einige höchst interessante Schlüsse über die Art der Reflexion von Diamanten gezogen hat. Wäre dieselbe nach den gewöhnlichen Gesetzen vor sich gegangen, so hätte beim Polarisirungswinkel beider Snbstanzen die Reflexion aufhören, und die Ringe hätten verschwinden müssen. Das war jedoch nicht der Fall. Die Ringe verschwanden nicht beim Polarisationswinkel des Diamanten, sondern der erste schwarze Ring zog sich zusammen, wenn man den Einfallswinkel allmälig zunehmen liess, und nahm endlich die Stelle des mittleren weissen Fleckes ein. Ein Theil des Lichtes wird daher beim Winkel der volkommensten Polarisation des Diamantes noch reflektirt, und es ist aus dem Phänomen klar, dass das Uebergehen von einem weissen zu einem schwarzen Mittelpunkt von einer allmäligen Aenderung der Phase der reflektirten Schwingung herrührt, welche fast 180° beträgt, während der Coefficient der Vibration selbst nicht bedeutend geändert wird. Der Diamant hat daher keinen Winkel vollkommener Polarisation, und Airy schliesst, dass die Art der Reflexion von dieser merkwürdigen Substanz, in der Nähe des Winkels der vollständigsten Polarisation, von allen andern verschieden sei, welche bisher beschrieben sind.

Fresnel's Reflexionstheorie hat experimentelle Bestätigung verschiedener Art, und in einem Umfange erhalten, welcher wenig Grund zum Zweifeln an ihrer Richtigkeit lässt. Wenn ein in irgend einer Ebene polarisirter Strahl

---

1) *„On the Phenomena of* Newton's *Rings, when formed between two transparent substances of different refractive powers."* *Cambridge Trans.* 1832. (Poggend. Ann. XXVII. p. 554.)

unter einem beliebigen Winkel auf eine reflektirende Fläche fällt, so ist der reflektirte Strahl noch immer polarisirt, aber seine Polarisationsebene hat sich geändert, und die Grösse dieser Aenderung hängt vom Einfallswinkel ab. Das Gesetz dieser Aenderung ergiebt sich sogleich aus FRESNEL'S Theorie; denn die Tangente des Neigungswinkels der Polarisationsebene des reflektirten Strahles gegen die Einfallsebene ist gleich dem Quotienten aus den Verrückungen in der Einfallsebene und in der zu ihr senkrechten Ebene. Die so hergeleitete Formel ist durch FRESNEL'S eigene Beobachtungen auf das Vollkommenste, und seitdem durch ARAGO'S und BREWSTER'S Beobachtungen noch vollständiger erklärt [1]).

Die Ansichten des Letzteren über die Beschaffenheit des zum Theil polarisirten Lichtes sind auf das Phänomen der durch Reflexion veränderten Polarisationsebene gegründet. Wenn man sich vorstellte, gewöhnliches Licht bestehe aus zwei entgegengesetzt polarisirten Bündeln, in Ebenen, welche 45° auf jeder Seite der Reflexionsebene geneigt sind, so ist klar, dass die Wirkung der Reflexion darin bestehen wird, dass sie jede dieser Ebenen näher an die Einfallsebene bringt, so dass die Polarisationsebenen der beiden Bündel sich einander nähern, und nach der Reflexion einen spitzen Winkel mit einander machen werden. Zum Theil polarisirtes Licht besteht nun nach BREWSTER aus zwei polarisirten Bündeln, deren Polarisationsebenen einen spitzen Winkel bilden, und es steht kein Theil desselben unter denselben Bedingungen wie gewöhnliches Licht [2]).

---

1) *Annales de Chimie, tom. XVII. Phil. Trans.* 1830.

2) BREWSTER hat nach diesen Principien die durch eine einfache Reflexion unter irgend einem Winkel scheinbar in der Einfallsebene polarisirte Lichtmenge berechnet, wobei er FRESNEL'S Formel für die Intensität des reflektirten Strahles annahm. Das Uebereinstimmen der Formel mit ARAGO'S Beobachtungen ergab sich als so nah, als es bei solchen Vergleichungen nur erwartet werden kann. „*On*

Diese Hypothese bekommt einiges Gewicht durch die Erklärung, welche sie von den Wirkungen der successiven Reflexionen giebt. Wenn so beschaffenes Licht auf einer zweiten reflektirten Fläche in derselben Einfallsebene aufgefangen wird, so werden die Polarisationsebenen der beiden Bündel einander näher gebracht werden, und so bei folgenden Flächen, bis bei einer hinlänglichen Anzahl von Reflexionen diese Ebenen offenbar mit der Einfallsebene zusammenfallen werden; das hervorgehende Licht wird sich als vollkommen in dieser Ebene polarisirt zeigen.

Diese scharfsinnige Theorie scheint einem bereits angeführten Einwurfe ausgesetzt, nämlich dass das aus der Vereinigung zweier entgegengesetzt polarisirten Bündel hervorgehende Licht nicht in jeder Hinsicht als der physische Repräsentant des gewöhnlichen oder unpolarisirten Lichtes angesehen werden kann. Ebenso schliesst es noch die Schwierigkeit ein, dass die Polarisationsebenen beider entgegengesetzt polarisirten Theile völlig willkürlich sind, und dass, wenn sie verschieden angenommen werden, die Resultate physikalisch von einander verschieden sein werden. So wird z. B. wenn man annimmt, die eine der beiden Ebenen fiele mit der Reflexionsebene selbst, und die andere mit der zu dieser senkrechten Ebene zusammen, keine dieser Ebenen durch Reflexion geändert werden, dagegen aber wohl die Intensitäten der correspondirenden Bündel.

Brewster hat ferner auf experimentellem Wege die Wirkung der Refraktion auf die Polarisationsebene des gebrochenen Strahles untersucht, und er fand, dass das Gesetz der Aenderung durch eine sehr einfache und elegante Formel ausgedrückt werden könne [1]). Diese Formel ist eine

the Law of Partial Polarisation of Light by Reflexion." Phil. Trans. 1830. (Poggend. Ann. XIX. p. 259.)

1) Wenn a und a' die Azimuthe der Polarisationsebenen des einfallenden und des gebrochenen Strahles, von der Reflexionsebene aus gezählt, und i und i' der Einfalls- und Brechungswinkel sind, so ist

$$\cot a' = \cot a \cdot \cos(i - i')$$

nothwendige Folgerung aus FRESNEL'S Theorie, obwohl es ihm selbst entgangen zu sein scheint. Ihre Entdeckung von BREWSTER vermehrt die grosse Anzahl von Beispielen seltenen Scharfsinnes, welche dieser Forscher bei seinen experimentellen Untersuchungen bereits gegeben hat. In derselben Abhandlung hat BREWSTER die theilweise Polarisation des Lichtes durch Brechung betrachtet. Bei der Untersuchung der Menge polarisirten Lichtes im gebrochenen Bündel bedient er sich eines Principes, welches dem von ihm schon beim reflektirten Strahl angewendeten ähnlich ist, und er kommt zu dem Resultat, dass die Mengen polarisirten Lichtes im reflektirten und gebrochenen Bündel genau einander gleich sind, welches auch der Einfallswinkel sein mag, ganz mit ARAGO'S Gesetz übereinstimmend. Die durch successive Brechungen hervorgebrachten Wirkungen werden nach denselben Principien erklärt.

BREWSTER scheint der erste gewesen zu sein, welcher sich mit den durch totale Reflexion auf polarisirtes Licht hervorgebrachten Wirkungen beschäftigte, und er beobachtete ganz besonders die complementären Farben, welche das so reflektirte Licht gab, wenn es durch einen Doppelspath zerlegt wurde [1]). In jener Zeit vermuthete sowohl er als YOUNG, dass diese Erscheinungen von der Interferenz der beiden Lichttheile abhängen möchten, welche bei ungleichen Tiefen reflektirt werden, indem nach YOUNG der eine Theil anfängt gebrochen zu werden, und dann durch die anhaltende Einwirkung derselben Kraft wieder zurückgewendet wird [2]).

FRESNEL hat ferner in einer früheren Zeit seiner Untersuchungen beobachtet, dass wenn ein in einer Ebene, welche um einen Winkel von 45° gegen die Einfallsebene geneigt ist, polarisirter Strahl eine totale Reflexion erleidet,

---

„On the Laws of Polarisation of Light by Refraction." *Phil. Trans.* 1830. (POGGEND. Ann. XIX. p. 281.)

1) *Journal Royal. Inst. vol. III.*

2) *Suppl. Encyc. Brit.*, Art. Chromatik.

er alsdann theilweis depolarisirt ist, und dass diese Depolarisation durch zwei totale Reflexionen bei einem Einfallswinkel von etwa 50° vollständig bewirkt wird. Das reflektirte Licht, welches alsdann circular polarisirt ist, ist nach der Theorie aus zwei gleichen Bündeln zusammengesetzt, von welchen der eine in der Einfallsebene, und der andere in der zu ihr senkrechten Ebene polarisirt ist, und welche in ihrem Gange um eine Viertelwelle verschieden sind. Daraus folgt, dass die beiden Bündel, in welche das einfallende Licht zerlegt werden kann, und welche in diesen beiden Ebenen polarisirt sind, nicht in derselben Tiefe reflektirt werden, oder dass sie ungleiche Phasenänderung im Augenblick der Reflexion erlitten haben, so dass der eine derselben nach der Reflexion dem andern voraus ist. Nach vielen erfolglosen Versuchen zur Entdeckung der Art und Weise, in welcher diese Verschiedenheit der Phase vom Einfallswinkel abhängt, kam Fresnel endlich zur Lösung dieses Problems durch Untersuchung der bereits angeführten Formel für die Intensität des reflektirten Lichtes.

Wenn der Einfallswinkel grösser ist, als der Winkel totaler Reflexion, und das Licht vom dichteren in das dünnere Medium übergeht, so wird diese Formel imaginär. Aber aus dem Gesetz der Erhaltung lebendiger Kräfte ist klar, dass die Intensität des reflektirten Lichtes in diesem Falle ganz einfach gleich der des einfallenden ist. Wie soll man nun die imaginären Ausdrücke übersetzen? Sie zeigen nach Fresnel an, dass die Vibrationsperioden der einfallenden und reflektirenden Fläche dort nicht mehr zusammenfallen, wenn die Reflexion total ist; oder mit andern Worten, dass der Strahl eine Phasenänderung im Augenblick der Reflexion erleidet. Die Grösse dieser Aenderung ist durch eine Reihe der scharfsinnigsten Räsonnements aus den allgemeinen Principien hergeleitet. Wenn nun ein, in irgend einem Azimuth polarisirter Strahl, auf die reflektirte Fläche unter einem Winkel fällt, welcher grösser ist, als der Winkel totaler Reflexion, so kann er in zwei zer-

legt werden, einer in der Einfallsebene, und der andere in der zu ihr senkrechten polarisirt. Die Intensitäten dieser beiden Theile werden sich durch Reflexion nicht ändern, wohl aber ihre Phasen, und zwar jede um eine andere Grösse. Die reflektirte Schwingung wird daher die Resultante aus den beiden rechtwinkligen Schwingungen, welche in ihren Phasen verschieden sind, sein. Diese Vibration wird folglich elliptisch sein, und das reflektirte Licht elliptisch polarisirt. Wenn das Azimuth der Polarisationsebene des einfallenden Strahles 45° ist, so sind die Intensitäten der zerlegten Theile gleich, und wenn ausserdem ihre Phasenverschiedenheit, nach der Reflexion, gleich einer Viertelundulation ist, so wird aus der Ellipse ein Kreis werden, und das Licht circular polarisirt sein.

Fresnel fand durch Reduktion dieser Formeln auf Zahlen für St. Gobainglas, dass die Phasenverschiedenheit beider Theile des reflektirten Lichtes genau $\frac{1}{8}$ Undulation betrug, wenn der Einfallswinkel 54° 37′ war. Als er daher ein Parallelepiped von diesem Glase, an welchem die Seite durch die der Strahl eintrat, und die, durch welche er austrat, gegen die übrigen unter diesem Winkel geneigt waren, polirte, so folgte, dass ein senkrecht auf eine dieser Flächen fallende Strahl, der von beiden Seiten reflektirt wurde, aus der gegenüberstehenden Seite senkrecht austreten würde, und dass die Phasenverschiedenheit in beiden Theilen des doppelt reflektirten Strahles eine Viertelundulation betrüge. Wenn nun der einfallende Strahl in einer Ebene polarisirt wird, welche unter einem Winkel von 45° gegen die Reflexionsebene geneigt ist, so wird das heraustretende Licht circular polarisirt sein. Dies fand sich durch einen Versuch bestätigt; und das so construirte Parallelepiped, bekannt unter dem Namen von Fresnel's Rhombus, leistet bei den Versuchen über circulare und elliptische Polarisation wesentliche Dienste. Die Resultate dieser merkwürdigen Theorie sind von Fresnel durch andere passend ausgewählte Experimente bestätigt, so dass,

obwohl das Räsonnement, auf welches sie gegründet ist, keinesweges streng zu nennen ist, doch nur wenig Zweifel an ihrer allgemeinen Richtigkeit übrig bleiben kann. FRESNEL erkannte sehr wohl die Unvollkommenheit seiner Lösung, aus dem analytischen Gesichtspunkte betrachtet. In seiner Abhandlung hat er besonders daran gedacht, eine Methode anzuwenden, durch welche er eine genaue Lösung des Problems erhielte, ohne durch eine willkürliche Hypothese beschränkt zu sein, und er schlug selbst vor, das Ganze noch einmal in Betracht zu ziehen. Aber seine glänzende Bahn von Entdeckungen wurde durch einen zu frühen Tod schnell abgekürzt.

Das Problem der Reflexion und Refraktion des polarisirten Lichtes hat ferner CAUCHY's Aufmerksamkeit in Anspruch genommen [1]). Die von diesem Mathematiker gegebene Lösung geht von einer Betrachtung der Bedingungen aus, welche an der Trennungsebene zweier Medien erfüllt werden müssen, und er nimmt an, die Dichtigkeit des Aethers sei in beiden ein und dieselbe. Die für die Amplituden der Vibrationen in der reflektirten Welle erhaltenen Ausdrücke stimmen mit FRESNEL's. Die entsprechenden Grössen für die gebrochene Welle weichen von den aus FRESNEL's Theorie hergeleiteten ab, und zwar nur durch die Umkehrung des Quotienten aus dem Einfalls- und Brechungswinkel, welcher in beiden Fällen als Faktor vorkommt, und so stimmen die Formeln, obwohl sie verschieden sind, in vielen Beispielen in ihren Folgerungen überein, (wie z. B. bei der Bestimmung der Polarisationsebene des gebrochenen Bündels). Es ist indess wichtig zu bemerken, dass nach CAUCHY's Formel die Geschwindigkeiten der Aethermolekel in der gebrochenen Welle grösser sind, als in der einfallenden, so dass das Gesetz der lebendigen Kräfte verletzt wird. Das ist bei FRESNEL's Resultaten nicht der Fall, welche sogar aus diesem Gesetz hergeleitet sind.

---

1) *Bulletin universel, tom. XIV. p.* 6.

Die Erscheinungen bei der Reflexion von Metallen müssen jedoch in unsere Eintheilung der Wissenschaft vom Licht noch eingefügt werden.

Die durch Reflexion von metallischen Oberflächen auf das Licht hervorgebrachten Wirkungen entgingen Malus Forschergeist nicht. Aus seinen ersten Versuchen über diesen Gegenstand schloss Malus, dass die Metalle keine polarisirenden Wirkungen auf das Licht ausübten. Bald nachher änderte er jedoch seine Meinung, und fand, dass das Phänomen der Polarisation theilweise hervorgebracht werde, und die Wirkung bis zu einem Maximum steige, wenn der Einfallswinkel sich einem bestimmten Winkel nähere. Die belehrendste Art jedoch, diese Erscheinungen zu studiren, ist die, dass man auf den metallischen Reflektor einen Strahl fallen lässt, welcher in einer, unter einem Winkel von 45° gegen die Reflexionsebene geneigten Ebene polarisirt ist, und das reflektirte Bündel durch ein doppelt brechendes Prisma zerlegt. Auf diese Weise fand Malus, dass wenn der Einfallswinkel sehr klein oder sehr gross war, der reflektirte Strahl noch immer polarisirt war, während er bei mittleren Incidenzen depolarisirt, und das Bündel in jeder Lage des Rhombus in zwei Strahlen getheilt war. Aus diesen Thatsachen schloss Malus, dass der Unterschied zwischen Metall und durchsichtigen Körpern darin bestehe, dass letztere alles Licht, welches in einer Ebene polarisirt ist, reflektiren, und alles in der entgegengesetzten Ebene polarisirtes brechen, während Metalle dagegen Licht reflektiren, welches in beiden Ebenen polarisirt ist.

Die Polarisation durch Metalle wurde demnächst von Brewster untersucht, und seine Arbeiten darüber machen die wichtigste Vermehrung aus, welche unser Wissen von den Gesetzen des polarisirten Lichtes in neuerer Zeit erhalten hat [1]). Wenn Licht, welches von einer metallischen

1) *„On the Phenomena and Laws of Elliptic Polarisation as exhibited in the Action of Metalls upon Light.“ Phil. Trans.* **1830. (Poggend. Ann. XXI p. 219.)**

Fläche reflektirt ist, durch einen doppelt brechenden Krystall zerlegt wird, so bemerkt man, dass es zum Theil in der Reflexionsebene polarisirt ist. Die Wirkung ist beim Bleiglanz am bedeutendsten, und beim Silber am unbedeutendsten; der Winkel, bei welchem sie ein Maximum ist, ist etwa 74°, aber er ändert sich mit dem Metall. Durch successive Reflexionen in ein und derselben Ebne fand BREWSTER, dass die Menge polarisirten Lichtes zunahm, und dass durch eine hinlängliche Anzahl von Reflexionen das Licht vollständig in der Einfallsebene polarisirt wurde. Die Anzahl von Reflexionen, welche erforderlich war, um diese Wirkung hervorzubringen, war bei verschiedenen Metallen bedeutend verschieden.

Um die Natur und die Gesetze dieses Phänomens zu bestimmen, ist es nöthig, die auf polarisirtes Licht hervorgebrachte Wirkung zu untersuchen. Nach MALUS Methode fand nun BREWSTER, dass wenn ein im Azimuth von 45° polarisirter Lichtstrahl unter einem Winkel, der grösser als 40° und kleiner als 86° war, mit einem metallischen Reflektor aufgefangen wurde, das reflektirte Licht zum Theil depolarisirt war. Die hervorgebrachte Wirkung war bei einem Winkel von 74° am grössesten, und wenn das Licht in derselben Ebene und bei demselben Winkel eine zweite Reflexion erfuhr, so zeigte es wieder die Eigenschaft von in einer Ebene polarisirtem Lichte. Diese neue Ebene liegt stets auf der anderen Seite der Reflexionsebene, und ihr Azimuth ändert sich zwischen den Gränzen 0° und 45°, und ist für Silber am grössesten und für Blei am kleinsten. Nun ist klar, dass das durch eine einzige Reflexion hervorgebrachte Licht kein gewöhnliches Licht sein kann. Eben so wenig linear polarisirtes (*planpolarized*), weil es bei keiner Stellung des analysirenden Kalkspathrhombus verschwindet. BREWSTER schliesst, dass dieses Licht eine bisher unbekannte Polarisation erhalten habe, welche zwischen die lineäre und die circuläre zu stellen sei. Er nennt sie elliptische Polarisation, weil der Reflexionswinkel, unter wel-

welchem dieses Licht wieder linear polarisirtes wird, in irgend einem Azimuth der zweiten Reflexionsebene gegen die erste, durch die veränderlichen Radien einer Ellipse dargestellt werden können, während diese Winkel beim circular polarisirten in allen Azimuthen gleich sind [1]). David Brew-

---

1) Neumann hat in Poggend. Ann. XXVI. p. 89. theoretische Untersuchungen über diesen Gegenstand bekannt gemacht, die, wie Brandes sagt, erst Licht und Zusammenhang hineinbringen, und darum höchst schätzenswerth sind. Er zeigt, dass die Theorie alles das finden lehrt, was Brewster's Versuche ergeben, und dass die Abweichungen beider gering erscheinen. Er giebt zwei Formeln, welche hinreichen, alle Erscheinungen der elliptischen Polarisation für jedes Metall, wenn sein Polarisationswinkel und das Verhältniss der Schwächung bei der Incidenz unter dem Polarisationswinkel bekannt ist, numerisch zu bestimmen, und eine andere, wonach berechnet die Werthe so weit mit den Beobachtungen übereinstimmen, dass damit bewiesen ist, sie stellt das Phänomen der elliptischen Polarisation genau dar. Wir wollen noch anführen, was N. über die Farbenerscheinung dabei sagt: „Dass durch die wiederholten Reflexionen polarisirten Lichtes von Metallen Farben entstehen müssen, wie beim Durchgang desselben durch Krystalle, ist nothwendig, weil die Wellenlänge hier, wie dort, für die verschiedenen homogenen Strahlen verschieden ist, und weil in beiden Fällen die Verzögerung abhängt von dem Refraktionscoefficienten des einzelnen homogenen Strahles. Es treten aber verschiedene Umstände zusammen, welche diese Farbenerscheinungen von der Ordnung der Newton'schen Farbenringe und derjenigen, die in Krystallblättchen bei wachsender Dicke oder zunehmender Schiefe des Durchganges des Lichtes durch sie meistens statt findet, gänzlich entfernen. Zuerst die excessive Dispersion, welche einige Metalle wenigstens, wie Brewster es beobachtet hat, auf das Licht ausüben. Dazu kommt die höchst-merkwürdige Thatsache, welche Brewster entdeckte, dass die Brechungswinkel für das blaue Ende grösser, als für das rothe Ende des Farbenspektrums sind. (Beim Silber ist der Polarisationswinkel für die blauen Strahlen $=70°,3$, für die rothen $=75°,3$, und da die Tangenten der Polarisationswinkel das Brechungsverhältniss angeben, so ist dieses für die blauen 2,824, für die rothen 3,866). Ferner die Veränderlichkeit des Verhältnisses der Intensitäten der parallel und senkrecht gegen die Reflexionsebene polarisirten Strahlen, welches von der Schiefe, der Anzahl der

ster scheint zur Annahme des Ausdruckes „elliptische Polarisation" in dieser Weise durch sein Bestreben veranlasst worden zu sein, so viel als möglich jede Bezugnahme auf Theorie zu vermeiden. Die Gesetze, welche er erhalten hat, gehören jedoch dem in jenem Sinne elliptisch-polarisirten Lichte an, in welchem der Ausdruck von Fresnel eingeführt wurde. Es ergiebt sich nämlich aus der Theorie der Zusammensetzung von Schwingungen, wie sie von diesem letzteren zum Grunde gelegt wurde, dass die aus der Vereinigung zweier geradlinigen und rechtwinkligen Schwingungen hervorgehende Vibration im Allgemeinen eine elliptische sein wird; so dass zwei entgegengesetzt polarisirte Bündel im Allgemeinen ein elliptisch-polarisirtes Bündel zusammensetzen, welche Ellipse eine gerade Linie wird, wenn die Phasenverschiedenheit heider Theile ein gerades Vielfaches von 180° ist. Wenn man daher durch die Wirkung der Reflexion zwei solche Bündel um 90° in der Phase differiren lässt (wie Brewster gezeigt hat, dass es geschieht, wenn ein in dem Azimuth von 45° polarisirter Strahl unter dem Winkel der vollkommensten Polarisation für Metall auffällt), so wird eine zweite Reflexion in derselben Ebene und unter demselben Winkel die Differenz von 180° steigern, und das hervorgehende Licht wird linear polarisirt sein. In andern Theilen seiner Abhandlung scheint Brewster indess jene Theorie anzunehmen; denn er spricht von einer elliptischen Polarisation, welche durch die Interferenz zweier ungleicher Theile entgegengesetzt polarisirten Lichtes hervorgebracht wird, und berechnet sogar ihre Phasendifferenz für irgend einen Einfallswinkel.

Die Identität des durch Metallreflexion hervorgebrachten Lichtes mit dem elliptisch polarisirten Lichte der Wellentheorie scheint durch eine Beobachtung Airy's ausser allem Zweifel gesetzt. Wenn die Newton'schen Ringe zwischen

---

Reflexionen und der Dispersion, welche das Metall ausübt, abhängt." A. d. Ü.

Glas und Metall gebildet werden, und das einfallende Licht polarisirt ist, der Einfallswinkel aber grösser ist, als der Polarisationswinkel des Glases, so findet man, dass die Ringe sich erweitern, sobald das Azimuth der Polarisationsebene gegen die Reflexionsebene vergrössert wird, und dass die Erweiterung ein Maximum erreicht, wenn diese beiden Ebenen senkrecht zu einander werden. Um dieses Faktum zu erklären hat Airy gezeigt, dass wenn die Vibrationen des einfallenden Bündels in zwei zerlegt werden, einer nämlich in der Einfallsebene und der andere in der zu ihr senkrechten Ebene, es nothwendig sei anzunehmen, dass ihre Phasen ungleich durch Reflexion geändert werden, indem die Phasen der Vibrationen in der Reflexionsebene mehr verzögert werden, als in der zu ihr senkrechten. Die beiden entgegengesetzt polarisirten Theile werden daher nach der Reflexion in den Phasen verschieden sein, und deshalb ein elliptisch-polarisirtes Bündel ausmachen. Airy beobachtete ein ähnliches Phänomen, wenn Newton's Ringe zwischen Diamant und Glas gebildet wurden, und der Einfallswinkel um wenige Grade kleiner war, als der Winkel der vollkommensten Polarisation für Diamant, und er schliesst, dass bei solchen Incidenzen die Art der Reflexion vom Diamant der Metallreflexion analog sein.

Brewster hat seine Untersuchungen über die Reflexion von Metallen auf eine grosse Menge von Fällen ausgedehnt, und die Wirkungen successiver Reflexionen in ein und derselben oder in verschiedenen Ebenen, so wie bei demselben oder bei verschiedenen Winkeln verfolgt. Wenn das Licht, welches durch zwei Reflexionen in ein und derselben Ebene und bei dem Winkel der vollkommensten Polarisation wieder zu linear-polarisirtem geworden ist, eine dritte Reflexion unter denselben Umständen erfährt, so wird es wieder elliptisch-polarisirt. Durch eine vierte Reflexion wird es wieder zu linear-polarisirtem, aber die Polarisationsebene ist der Reflexionsebene näher gebracht. Diese fortgesetzte Annäherung der Polarisationsebene an die Reflexionsebene

setzt Brewster in den Stand, nach seinen eigenen Ansichten die Wirkung successiver Reflexionen auf gewöhnliches Licht zu erklären.

Es bleibt endlich noch übrig, die Fresnel'sche Theorie auf die Reflexion an der Oberfläche eines Mediums auszudehnen, in welchem die Elasticität des Aethers verschieden ist nach verschiedenen Richtungen. Alles, was wir von diesen interessanten Thatsachen wissen, verdanken wir dem unermüdlichen Eifer David Brewster's. Malus hatte angenommen, und die Meinung scheint bei den späteren Forschern Geltung behalten zu haben, dass die äusseren Flächen krystallisirter Substanzen auf das reflektirte Licht genau auf dieselbe Weise wirken, wie Flächen gewöhnlicher Media, oder in der Sprache der Emissionstheorie, dass die reflektirenden Kräfte sich bis über die Grenzen der polarisirenden Kräfte des Krystalles ausdehnen. Brewster fand Veranlassung diese Meinung zu bezweifeln, und 1819 unternahm er eine ausgedehnte Reihe von Untersuchungen über die Reflexion von Krystallen. Eines der ersten Resultate, zu dem er gelangte, war, dass der Winkel der vollkommenen Polarisation für ein und dieselbe Fläche sich mit der Neigung der Reflexionsebene gegen den Hauptschnitt des Krystalles ändert, so dass er am kleinsten ist, wenn die Reflexionsebene mit dem Hauptschnitt zusammenfällt, um am grössesten, wenn sie senkrecht zu ihm steht, und dass bei verschiedenen Flächen die Aenderung von der Neigung der Fläche gegen die Axe des Krystalles abhängt. Die Differenz zwischen dem grössten und kleinsten Winkel beim Doppelspath auf einer der Spaltungsflächen des Krystalles fand sich zu mehr als 2°.

Aber die auf die Polarisationsebene hervorgebrachten Wirkungen sind noch merkwürdiger. Indem Brewster die reflektirende Kraft dadurch schwächte, dass er die Reflexion in der Berührungsfläche des Krystalles und irgend einer Flüssigkeit, wie Cassiaöl, welche fast dasselbe Brechungsvermögen hat, statt finden liess, fand er, dass der Strahl

nicht länger in der Reflexionsebene polarisirt war, und dass die Abweichung der Polarisationsebene von der Reflexionsebene von dem Winkel abhängt, welchen der einfallende Strahl mit der Axe des Krystalles macht. BREWSTER fand, dass sich diese Relation durch das Gesetz ausdrücken lasse, dass der Sinus der halben Abweichung sich wie die Quadratwurzel aus dem Sinus der Neigung des einfallenden Strahles gegen die Axe verhält [1]).

Es ist sehr zu wünschen, dass die Aufmerksamkeit der Analysten auf das Problem der Reflexion an der Oberfläche ungewöhnlicher Media gelenkt werde. Es ist dies eine der sehr wichtigen Abtheilungen der Wissenschaft vom Licht, welche der Wellentheorie noch nicht ihren Tribut gebracht haben, und es lässt sich kaum ein schönerer Gegenstand zur Uebung mathematischer und physikalischer Kunstfertigkeit finden [2]).

---

1) *„On the action of Crystallized Surfaces upon Light,"* *Phil Trans.* 1829.

2) Seitdem Obiges niedergeschrieben, hat M'CULLAGH einen Ausdruck für den Polarisationswinkel an der Oberfläche krystallisirter Medien in dem Falle erhalten, wo die Reflexionsebene mit einem der Hauptschnitte des FRESNEL'schen Ellipsoides zusammenfällt, und er fand, dass das Gesetz, welches er durch Analogie auf alle Fälle ausdehnte, mit grosser Genauigkeit die Beobachtungen BREWSTER's in sich fasst. Wenn a und b die halben Axen des elliptischen Schnittes bezeichnen, welcher durch das Schneiden der Reflexionsebene und des Ellipsoides der Indices (oder des Ellipsoides, dessen Axen in der Richtung mit den Axen der Elasticität des Mediums zusammenfallen, und ihren drei Hauptindices gleich sind) gebildet wird, und r der Radius desselben Schnittes ist, der mit der Vorderseite des Krystalles zusammenfällt, so würde der Polarisationswinkel w ein und derselbe sein, auf welcher Seite der Senkrechten der Strahl auch einfallen mag, und sein Werth ist durch die Formel gegeben

$$\sin^2 w = \frac{1 - \frac{1}{r^2}}{1 - \frac{1}{a^2 b^2}}$$

III. Doppelte Brechung.

Das Phänomen der doppelten Brechung wurde zuerst von Erasmus Bartholinus im Doppelspath entdeckt. Nach einer langen Reihe von Beobachtungen fand er, dass der eine der Strahlen im Innern des Krystalles das von Snellius beobachtete bekannte Gesetz der Brechung befolgte, während der andere nach einem neuen und ungewöhnlichen Gesetz gebeugt wurde. Ein Bericht über diese Untersuchungen wurde zu Copenhagen 1669 herausgegeben, unter dem Titel: *Experimenta Crystalli Islandici Disdioclastici, quibus mira et insolita refractio detegitur.*"

Als es Huygens gelang, die Gesetze der gewöhnlichen Brechung aus der Wellentheorie herzuleiten, so war es natürlich, dass er untersuchte, ob diese neuen Erscheinungen auf dieselbe Theorie zurückgeführt werden könnten, und bei seinen Bemühungen, beide Klassen von Erscheinungen mit einander zu vereinigen, gelang es ihm glücklich, das richtige Gesetz der ungewöhnlichen Brechung zu finden. Huygens hatte bereits gezeigt, dass die Richtung des gebrochenen Strahles in Glas und anderen unkrystallisirten Substanzen, aus der Annahme hergeleitet werden könne, die Aetherwelle sei innerhalb der Substanz eine Kugel, oder mit andern Worten, die Geschwindigkeit der Wellenfortpflanzung sei nach allen Richtungen dieselbe. Einer der Strahlen im Doppelspath befolgte auch, wie man fand, dasselbe Gesetz, und indem er schloss, dass das Gesetz, welches der andere befolgt, obwohl nicht so einfach, diesem doch an Einfachheit zunächst stände, so nahm er an, die Gestalt seiner Welle sei das Umdrehungssphäroid, wo dann die grössere und kleinere Axe der Grund-Ellipse in dem Verhältnisse des grössesten und kleinsten Brechungsindex ständen. Da nun die Gestalt der Welle bekannt war, so wurde das Brechungsgesetz aus dem Princip der Uebereinanderlage kleiner Bewegungen hergeleitet. Man stelle sich vor, es hätten drei Flächen ihren gemeinschaftlichen Mittel-

punkt im Einfallspunkte, und sie repräsentirten respektive die gleichzeitigen Lagen dreier Wellen, welche von jenem Punkte ausgehen, die erste in der Luft, die anderen beiden innerhalb des Krystalles. Der einfallende Strahl möge die Luftwelle treffen, und an dem Schneidungspunkte werde eine Tangentialebene gelegt; durch die Schneidungslinie dieser Ebene mit der brechenden Oberfläche seien Ebenen gelegt, welche beide gebrochene Wellen berühren, so sind die Linien, welche die Mittelpunkte mit den Berührungspunkten verbinden, die Richtungen beider gebrochenen Strahlen. Diese schöne Construktion und die übrigen Betrachtungen HUYGENS über die ungewöhnliche Brechung, sind im fünften Kapitel seines *Traité de la lumière* enthalten.

HUYGENS war nicht im Stande, die Existenz einer doppelten Welle innerhalb des Krystalles mit der Annahme eines einzigen vibrirenden Mediums zu vereinigen, und er war deshalb gezwungen anzunehmen, es existirten zwei solcher Media, und die kugelförmige Welle werde durch die Vibrationen des Aethers allein fortgepflanzt, dagegen entstehe die sphäroidische Welle aus den Vibrationen des Krystalles, verbunden mit denen des Aethers.

An die Stelle von HUYGENS Construktion setzte NEWTON eine andere, ohne die theoretischen Gründe anzuführen, nach welchen er sie gebildet hatte, oder auch nur einen einzigen Versuch zu ihrer Bestätigung bekannt zu machen [1]). In dieser ungenügenden Gestalt musste das Problem der doppelten Brechung fast ein Jahrhundert lang ruhen, und erst in der Periode des Wiederauflebens der physikalischen Wissenschaften in YOUNG'S Händen wurde das erste neue Licht auf diese Frage geworfen. Dieser scharfsinnige Forscher wurde durch die Wellentheorie dazu bestimmt, HUYGENS' Gesetz als richtig anzunehmen, und auf seinen Rath unternahm WOLLASTON die experimentelle Prüfung [2]), welche

1) *Optice, lib. III. Quaest.* 25.

2) *„On the Oblique Refraction of Iceland Crystal." Phil. Trans.* 1802.

die Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Welt auf sich lenkte, und mit der allgemeinen Annahme endete. Das französische Institut gab bald darauf die Lösung der Frage über doppelte Brechung als Preisaufgabe, und die vortreffliche Abhandlung von MALUS liess keinen Zweifel an der Richtigkeit des HUYGENS'schen Gesetzes [1]).

MALUS Untersuchung war hauptsächlich auf den Doppelspath gerichtet, aber er stellte auch einige ähnliche Messungen mit Quarz, Schwerspath und Arragonit an. In dem ersten dieser Krystalle hielt er fälschlich den gewöhnlichen für den ungewöhnlichen Strahl, und da die Flächen, welche er an den beiden anderen zur Untersuchung wählte, zum Erkennen der Eigenthümlichkeiten gerade nicht sehr geeignet waren, so begnügte er sich mit einer schnellen Verallgemeinerung des im Doppelspath entdeckten Gesetzes, und schloss, dass es allen doppeltbrechenden Körpern zukomme. MALUS ging in derselben Abhandlung weitläufig auf mehrere, mit dem Problem der doppelten Brechung zusammenhängende Fragen ein, und zeigte in's Besondere, dass die Gesetze der ungewöhnlichen Reflexion an den hinteren Flächen der Krystalle sich aus dem HUYGENS'schen Gesetze herleiten lassen. In einem, im folgenden Jahre [2]) dem Institut vorgelegten Memoire, erweitert er das Verzeichniss der Körper, welche die Eigenschaft der doppelten Brechung besitzen bedeutend, und er kommt zu dem Schlusse, dass diese Eigenschaft allen Krystallen zukomme, die ausgenommen, deren Grundform der Würfel oder das Oktaeder ist. Die meisten organischen, vegetabilischen oder animalischen Substanzen zeigten dieselben Eigenschaften.

Im Doppelspath ist der ungewöhnliche Brechungsindex kleiner, als der gewöhnliche. Der gewöhnliche Strahl ist folglich immer von der Axe des Krystalles abgebeugt,

---

1) *„Théorie de la double refraction." Mém. Inst.*

2) *„Sur l'axe de refraction des cristaux et des substances organisées." Mem. Inst.* 1811.

und man hatte angenommen, dasselbe Gesetz gelte für alle doppeltbrechende Substanzen. Biot machte die wichtige Entdeckung, dass in vielen Krystallen der ungewöhnliche Index grösser sei als der gewöhnliche, und der ungewöhnliche Strahl daher nach der Axe hin gebrochen werde. Er nannte Krystalle dieser Art attraktive, dagegen die ersteren repulsive, da die ungewöhnliche Brechung nach der Emissionstheorie anziehenden oder abstossenden Kräften zugeschrieben wird, welche so wirken, als wenn sie von der Axe ausgingen [1]). Diese Krystalle werden jetzt allgemein durch die Benennungen positive und negative unterschieden. Das Huygens'sche Gesetz gilt sowohl für positive, als für negative Krystalle, indem das Sphäroid im ersteren Falle mehr in die Länge gezogen, und im letzteren mehr abgeplattet wird.

Die von Huygens gegebene Construction für die Richtung der beiden gebrochenen Strahlen ist, wie gesagt, eine unmittelbare Folgerung aus der angenommenen Gestalt der Wellenoberfläche. Es ergiebt sich leicht aus dem bereits berührten Principe Huygens', dass dieselbe Construktion für alle Fälle gelten wird, welche auch die Gestalt der Welle oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeit innerhalb des Krystalles sein mag, so dass das Gesetz der Richtung bestimmt ist, wenn das der Geschwindigkeit bekannt ist. Ein ähnlicher Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Molekels und seinem Wege ist in der Emissionstheorie durch das Gesetz der kleinsten Wirkung nachgewiesen. Wir wissen, dass dies Princip allgemein für die Bewegung eines der Einwirkung anziehender oder abstossender Kräfte unterworfenen Punktes gilt, und wenn man es auf ein Lichttheilchen anwendet, auf das Kräfte einwirken, welche von den Theilchen des Körpers, die es trifft, ausgehen, so können wir den unbemerkbaren krummlinigen Theil der Trajektorie unberücksichtigt lassen, welche beim Uebergange aus einem

1) *Mém. Inst.* 1814.

Medium in ein anderes von verschiedener Dichtigkeit beschrieben wird, vorausgesetzt, wir nehmen mit NEWTON an, dass die von den Molekeln des Körpers auf die des Lichtes ausgeübten Kräfte nur auf unmerkliche Entfernungen bemerkbar sind. Bei dieser Vereinfachung des Problems haben wir es nur mit geraden Linien und gleichförmigen Geschwindigkeiten zu thun, und wenn die Abhängigkeit dieser Geschwindigkeiten von den Richtungen angenommen oder gegeben ist, so giebt das angeführte Princip eine Relation zwischen den Richtungen beider Theile der Trajektorie. Das war das Problem, dessen Lösung LA PLACE gab, in seiner Abhandlung über die Bewegung des Lichtes in durchsichtigen Medien [1]), und er erhielt zwei Gleichungen, welche jene Lösung vollkommen enthalten. LA PLACE wendete diese Resultate auf zwei Fälle an; auf einen, in welchem die Differenz gleich einer constanten Grösse ist, plus einer andern, welche sich ändert wie das Quadrat des Cosinus der Neigung des gebrochenen Strahles gegen die optische Axe. In dem ersteren dieser Fälle erhielt er das bekannte Gesetz von SNELLIUS, und die Refraktionsformel, welche er im letzteren erhielt, fand sich identisch mit der, welche sich aus HUYGENS' Construktion ergab.

LA PLACE nahm an, die Geschwindigkeit des ungewöhnlichen Strahles sei die Reciproke des Radius vector des HUYGENS'schen Ellipsoides, und daher die umgekehrte der angenommenen Geschwindigkeit in der Wellentheorie. Aber LA PLACE selbst hat gezeigt, dass die Construktion, welche diese Theorie angiebt, und welche HUYGENS zur Bestimmung der Richtung des gebrochenen Strahles anwendete, sich in das Princip der kleinsten Zeit auflöst, und zwar bei jeder Gestalt der Wellenoberfläche; und da das Gesetz der kleinsten Wirkung und das der kleinsten Zeit identisch sind, vorausgesetzt, dass die angenommenen Geschwindigkeiten reciprok sind, so hört es auf, befremdend zu sein,

---

1) *Mém. Inst.* 1805.

dass zwei so sehr verschiedene Methoden genau zu demselben Resultate führen. Der Unterschied zwischen Huygens' und La Place's Art, das Gesetz der ungewöhnlichen Brechung herzuleiten, ist wirklich genau derselbe wie der, welcher früher zwischen Fremat und Maupertuis in Betreff des gewöhnlichen Gesetzes der Sinus existirte.

Die Identität der durch beide Theorien erhaltenen Resultate ist seitdem von Ampere entschiedener dargelegt worden. Mit Hülfe des Principes der kleinsten Wirkung gelangte er zu folgendem allgemeinen Schluss, welches Gesetz auch für die Geschwindigkeiten angenommen sei: dass wenn von dem Einfallspunkte in ein ungewöhnliches Medium, als dem Mittelpunkte, zwei Flächen beschrieben werden, deren Radii vectiores sich umgekehrt verhalten, wie die Geschwindigkeiten der einfallenden und gebrochenen Strahlen in ihren Richtungen; und wenn die einfallenden und gebrochenen Strahlen diese Flächen treffen, und Tangentialebenen an die Berührungspunkte gelegt werden, so wird die Schneidungslinie dieser Ebenen in der Trennungsfläche beider Media liegen [1]). Daher ist die Lage des gebrochenen Strahles bestimmt, wenn die des einfallenden bekannt ist; und die so angewendete Construktion zu ihrer Bestimmung ist offenbar die Verallgemeinerung der bereits angeführten Huygens-schen Conrtruktion, wenn nur die Radii vectores im geraden Verhältniss der Geschwindigkeiten, statt im umgekehrten genommen werden.

Es ist nun klar, dass das Problem der doppelten Brechung, als physikalische Frage betrachtet, sich in die Bestimmung des Gesetzes der Geschwindigkeiten umwandelt. Newton zeigte, dass das constante Verhältniss der Geschwindigkeiten in gewöhnlichen Mitteln, und daher das Gesetz der Sinus, durch die Annahme erklärt werden könne, dass auf die Lichtmolekeln anziehende Kräfte einwirken, welche von den Molekeln des brechenden Körpers ausgehen

---

1) *Mém. Inst.* 1815.

und nur auf sehr kleine Entfernungen bemerkbar sind. Die Erscheinung der ungewöhnlichen Brechung wurde gleicherweise von La Place der Einwirkung ähnlicher, von den Molekeln des Krystalles ausgehender Kräfte zugeschrieben, aber modificirt durch die Gestalt dieser Molekel und derer des Lichtes, so wie durch die Art und Weise, auf welche sie gegen einander gestellt sind. Indess ist in der Emissionstheorie kein Versuch gemacht worden, den Punkt zu überschreiten, bis zu welchem Newton gegangen war, und die Geschwindigkeit des ungewöhnlichen Strahles in krystallisirten Medien aus irgend einer angenommenen Beschaffenheit der Molekulärkräfte herzuleiten[1]); und in der That scheint die Theorie, wenn der Zustand der Polarität noch zu den Gesetzen solcher Kräfte hinzugefügt wird, in unauflösliche Schwierigkeiten verwickelt. Die Brechung, welche ein polarisirter Strahl in einem Krystall erleidet, hängt von seiner Polarisationsebene ab, und durch eine einfache Aenderung dieser Ebene kann der gebrochene Strahl aus einem ungewöhnlichen in einen gewöhnlichen umgewandelt werden. Es ergiebt sich nun aus dem Phänomen, dass die ungewöhnliche Kraft keine Wirkung auf einen Strahl ausübt, welcher parallel mit der Hauptebene polarisirt ist; ihre Wirkung ist am grössesten auf einen Strahl, welcher in der zu dieser senkrechten polarisirt ist, und man muss annehmen, dass sie in jeder dazwischenliegenden Ebene in jedem dazwischenliegenden Grade auf die Strahlen wirke. Nun ist ein Strahl gewöhnlichen Lichtes nach der Emissionstheorie aus Molekeln zusammengesetzt, deren Polarisations-

1) Fresnel sagt im Anfange seiner Abhandlung über doppelte Brechung, dass La Place die Geschwindigkeit des ungewöhnlichen Strahles in einaxigen Krystallen aus der Hypothese einer resultirenden Kraft hergeleitet habe, welche senkrecht gegen die optische Axe wirkt, und sich wie das Sinusquadrat des Winkels ändert, welchen die Strahlen mit jener Linie machen. Es ist mir nicht möglich gewesen, in irgend einer von La Place's Schriften diesen angeführten Ausspruch aufzufinden.

ebene nach allen Azimuthen gewendet sind, und diese Molekel sollten folglich den Einfluss der ungewöhnlichen Kraft in jedem möglichen Grade fühlen. Statt in zweien gebrochenen Strahlen sollte daher ein solcher Strahl in unendlich viele getheilt werden, welche unter jedem möglichen Winkel zwischen den begrenzenden Richtungen der gewöhnlichen und ungewöhnlichen Strahlen geneigt sind.

Man hatte bisher angenommen, kein Krystall habe mehr als Eine optische Axe. Als Brewster die Ringe untersuchte, welche diese Axen in polarisirtem Lichte umgeben, machte er die wichtige Entdeckung, dass die grössere Anzahl der Krystalle zwei optische Axen besitze, und bald nachher entdeckte er den Zusammenhang zwischen diesen Verschiedenheiten der optischen Eigenschaft und der Krystallform.

Die optischen Axen können jedoch, wie Brewster gezeigt hat, nicht im Allgemeinen als die Fundamental-Axen des doppeltbrechenden Mediums betrachtet werden. Er nennt sie scheinbare Axen, und sieht sie als die Resultanten der anderen an, welche er wahre oder polarisirende Axen nennt, und von welchen man sich die Kräfte, welche die Phänomene der Polarisation und der doppelten Brechung hervorbringen, ausgehen denkt. Die von einer einzelnen Axe herwirkende Kraft wird durch die Differenz der Quadrate der Geschwindigkeiten der gewöhnlichen und ungewöhnlichen Strahlen gemessen, und man nimmt an, sie verhalte sich wie das Sinusquadrat des Winkels, welchen die Richtung des Strahles innerhalb des Krystalles mit ihr macht; und wenn zwei solcher Axen zusammenwirken, so nimmt man an, die Vergrösserung des Quadrates der Geschwindigkeit, welche von ihrer vereinigten Wirkung herrührt, sei gleich der Diagonale eines Parallelogrammes, dessen Seiten die Vergrösserungen des Quadrates der Geschwindigkeit, welche durch jede einzeln hervorgebracht wird, sind, und dessen Winkel der doppelte von dem ist, welcher von zwei durch den Strahl und

durch die Axen gehenden Ebenen gebildet wird [1]). Aus dieser Hypothese folgt, dass zwei rechtwinklig polarisirende Axen von gleicher Intensität, und beide positiv oder beide negativ eine einzige resultirende Axe rechtwinklig gegen beide bilden. Diese Axe ist von derselben Intensität wie die componenten Axen, aber sie hat entgegengesetzte Eigenschaft, und folglich heben sich drei gleiche, rechtwinklige Axen von gleicher Art einander in ihren Wirkungen auf, und haben keine Resultante. Also liegen die Gesetze der einaxigen Krystalle, sowohl wie die der einfach brechenden Medien in dieser Hypothese. Der Fall mit zwei resultirenden Axen lässt sich auf zwei ungleich polarisirende Axen zurückführen, und es ist gezeigt worden, es sei eine Folge aus der Formel, dass der Unterschied der Quadrate der Geschwindigkeiten des gewöhnlichen und ungewöhnlichen Strahles innerhalb des Krystalles proportional ist dem Produkt aus dem Sinus der Winkel, welche der letztere mit den resultirenden Axen macht. Biot entdeckte dies schöne Gesetz durch Analogie [2]), und fand später, dass es in dem von Brewster entdeckten Gesetze schon gelegen habe.

Der Ausdruck „polarisirende Kraft", scheint von Brewster ohne Bezug auf das Gesetz angenommen, welches für die Polarisationsebenen beider Bündel gilt, ein Gesetz, welches für zweiaxige Krystalle noch unbekannt ist. Bei einaxigen Krystallen konnte es nicht unbemerkt bleiben, da die Richtung des Strahles und der Axe in der Polarisationsebene eines der Bündel lag, während die des anderen eine rechtwinklig gegen die erstere durch den Strahl gehende Ebene war. Biot nahm an, diese Ebenen müssen in zweiaxigen Krystallen symmetrisch gegen die durch den Strahl und die beiden Axen gehenden Ebenen liegen, und fand so

1) *„On the laws of Polarization and Double Refraction in regulary crystallized Bodies."* *Phil. Trans.* 1818.

2) *„Mémoire sur les lois générales de la double refraction etc."* *Mém. Inst. tom. III.*

das einfache und schöne Gesetz, dass die Polarisationsebene eines der Bündel diejenige war, welche durch den Strahl ging, und den zwischen beiden durch die Axen gelegten Ebenen enthaltenen Winkel in zwei gleiche Theile theilte, während die des anderen senkrecht gegen die erstere war, oder den Supplementwinkel des vorigen in zwei gleiche Theile theilt.

Wenn ein Lichtstrahl in einen Krystall eintritt, so wird nach Biot's Hypothese angenommen, die zusammensetzenden Molekeln erhielten verschiedene Bewegungen um ihre Schwerpunkte, von der Natur der Kräfte abhängig, welche von den Partikeln des Körpers auf sie einwirken. Zuweilen werden die Molekeln des Strahles durch die Wirkung dieser Kräfte so gedreht, dass gewisse Linien in denselben, sogenannte Polarisationsaxen, alle ein und dieselbe Richtung haben, und diese Anordnung der Molekeln besteht während ihres ganzen weiteren Fortganges. Dagegen giebt es nach Biot andere Fälle, in welchen die Molekeln in bestimmten Perioden um ihre Schwerpunkte während ihres ganzen Ganges durch den Krystall oscilliren, während sie endlich in noch andern eine anhaltende Rotation erlangen. Auf die beiden letzteren Fälle werde ich später Gelegenheit haben zurückzukommen.

Die Phänomene der festen (beständigen) Polarisation schreibt Biot der Einwirkung gewisser Kräfte zu, welche er polarisirende Kräfte nennt. Bei einaxigen Krystallen nimmt er an, diese Kräfte wirkten in den Ebenen, in welchen beide Strahlen und die Axe des Krystalles liegen, indem die gewöhnliche polarisirende Kraft die Axen der Molekel in die Ebene zu bringen strebt, welche den Strahl und die Axe enthält, während die ungewöhnlich polarisirende Kraft sie nach der zu dieser senkrechten Ebene zieht. Wenn die Molekeln sich in jeder Hinsicht in ähnlichen Umständen befänden, so würden sie nothwendig der stärkeren dieser Kräfte gehorchen, und es würde nur Eine Polarisationsebene geben. Dies ist jedoch nach der Annahme nicht der Fall.

Den verschiedenen Phasen ihrer Anwandlungen bei ihrem Auffallen auf den Krystall zufolge sind die Molekeln geneigt, eher der einen oder der andern dieser Kräfte zu folgen, so dass, wenn ein polarisirter Strahl auf ein doppeltbrechendes Medium trifft, einige der Molekel den Einfluss der gewöhnlich polarisirenden Kraft erfahren, und ihre Polarisationsaxen in die Ebene gewendet haben, in welcher der Strahl und die Axe des Krystalles liegen, während auf andere die ungewöhnlich brechende Kraft einwirkt, und diese ihre Axen in die zu der vorigen senkrechten Ebene legen. Die Anzahl der Molekeln, welche der einen oder der anderen dieser Kräfte folgen, oder die Intensität der beiden polarisirten Strahlen hängt, nach der Annahme, von dem Winkel ab, welchen die Ebene der ursprünglichen Polarisation mit den beiden so eben erwähnten Ebenen macht. Wenn die Polarisationsebene mit der ersteren zusammenfällt, so hat die ungewöhnliche Kraft keine Wirkung, und der Strahl erhält nur die gewöhnliche Polarisation; das Umgekehrte findet statt, wenn die Polarisationsebene mit der zur vorigen Ebene senkrechten zusammenfällt. Aehnliche Annahmen wurden zur Erklärung der Polarisations-Phänomene in zweiaxigen Krystallen gemacht.

So stand es um die Theorie der doppelten Brechung, als FRESNEL diesen Gegenstand aufnahm. Wir sahen, dass das Brechungsgesetz sowohl in der Emissionstheorie, als in der Wellentheorie innig mit dem Gesetz für die Geschwindigkeiten verknüpft war und von ihm abhing, so dass sich das Problem, als physikalische Aufgabe betrachtet, in die Bestimmung des Letzteren auflöste. Jedoch mit Ausnahme von YOUNG's Ansichten über die Gestalt der Wellenoberfläche in einem, nach einer gegebenen Richtung zusammengedrückten oder ausgedehnten Medium [1]), war kein Versuch gemacht worden, die Geschwindigkeit des ungewöhnlichen Strahles aus den Principien einer der Theorien herzuleiten. Ja

1) *Quarterly Review, vol. II.*

Ja, das allgemeine Gesetz der Geschwindigkeit war, sogar als experimentelles Faktum, noch unbekannt, obwohl durch BREWSTER'S und BIOT'S Bemühungen eine wichtige Relation zwischen den Geschwindigkeiten der beiden Bündel entdeckt war. Aber dies war noch nicht alles. Es war klar, dass keine physikalische Theorie der doppelten Brechung als vollständig angesehen werden konnte, welche nicht zu gleicher Zeit das dazu gehörige Phänomen der Polarisation erklärte. In diesem Theile des Gegenstandes war indess noch nichts erreicht, und alles, was zur Erklärung des Phänomens der Polarisation gesagt worden war, ging nicht über einige vague Spekulationen über die Ursache derselben hinaus. FRESNEL'S Theorie, zu welcher ich nun komme, und welche nicht nur alle bekannten Phänomene in sich fasst, sondern sogar der Beobachtung vorangeeilt war, und Folgerungen vorausgesagt hatte, welche sich nachher vollständig bestätigten, wird, ich bin davon überzeugt, als die schönste Verallgemeinerung in der ganzen Physik betrachtet werden, welche seit der Entdeckung der allgemeinen Gravitation gemacht worden ist.

FRESNEL [1]) geht von der Annahme aus, die elastische Kraft des vibrirenden Mediums sei im Allgemeinen verschieden nach verschiedenen Richtungen. Dies ist in der That die allgemeinste Annahme, welche gemacht werden kann; und wir mögen nun annehmen, das vibrirende Medium sei der Aether innerhalb des Krystalles, oder die Molekeln des Körpers nehmen selbst an der vibrirenden Bewegung Antheil, so wird eine solche Verknüpfung und gegenseitige Abhängigkeit der Theile des festen Körpers und der Theile des besagten Mediums statt finden, dass wir für den einen immer wagen können anzunehmen, was für den andern bereits mit der klarsten Evidenz erwiesen ist [2]). Wenn nun

1) *„Mémoire sur la double refraction.“ Mém. Inst. tom. VII.* (POGGEND. ANN. XXIII.)

2) SAVART hat gezeigt, dass die Elasticität der Kry-

in einem so beschaffenen Medium eine Störung hervorgebracht, und irgend ein Theilchen aus seiner ruhigen Lage verrückt wird, so wird die Resultante aus den elastischen Kräften, welche dieser Verrückung Widerstand leisten, nicht im Allgemeinen in der Richtung dieser Verrückung wirken (wie in einem gleichförmig elastischen Medium), und deshalb wird das aus seiner Stelle bewegte Theilchen nicht direkt zu seiner Gleichgewichtslage zurückkehren. FRESNEL hat indess gezeigt, dass es drei zu einander rechtwinklige Richtungen giebt, in deren einer die elastischen Kräfte, wenn die Theilchen aus der Stelle bewegt sind, in der Richtung dieser Verrückung wirken, die Natur oder die Gesetze der Molekularattraktion mögen sein, welche sie wollen; und die einzige Annahme, welche er macht, ist, dass diese drei Richtungen durch den ganzen Krystall parallel mit einander gehen [1]). Diese Richtungen nennt FRESNEL Elasticitätsaxen. Er glaubt, dass sie auch zur Krystallform symmetrische Axen sein müssen, aber bemerkt zugleich, dass MITSCHERLICH gezeigt habe, bei einigen Krystallen sei das nicht der Fall [2]). Wenn von einer dieser Axen, und von jeder Linie, welche von demselben Punkte ausgeht, Theile genommen werden, welche sich wie die Quadratwurzeln der elastischen Kräfte in ihrer Richtung verhalten, so wird der Ort der Endpunkte dieser Theile eine Fläche sein, welche

---

stalle, aus ihren Schallvibrationen bestimmt, im Allgemeinen verschieden nach verschiedenen Richtungen ist. Die optische Axe des Doppelspathes ist die Axe der geringsten Elasticität, die des Quarzes dagegen die Axe der grössten Elasticität.

1) Dies wird der Fall sein, wenn die homologen Gruppen von Theilchen alle einander gleich sind, eine zugleich höchst einfache und höchst natürliche Anordnung, welche in den meisten krystallisirten Körpern beobachtet zu sein scheint. FRESNEL nimmt indess die Möglichkeit anderer regelmässiger Anordnungen an, und er glaubt, dass die Erscheinungen der Circular-Polarisation im Bergkrystall uns zu der Annahme nöthigen, dass ihre Molekeln nach einem etwas einfacheren Gesetze angeordnet seien.

2) Siehe *Bulletin de la Société philomatique*, März 1824.

FRESNEL die Fläche der Elasticität nennt. Diese Fläche bestimmt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle, wenn die Richtung ihrer Vibrationen gegeben ist. Denn die Geschwindigkeit der undulatorischen Fortpflanzung in einem elastischen Medium, welche sich wie die Quadratwurzel aus der Elasticität verhält, muss durch den Radiusvector der Elasticitätsfläche in der Richtung der Vibrationen repräsentirt werden.

Wir wollen uns nun eine ebene Welle vorstellen, welche in den Krystall tritt. Nach dem Princip der Querschwingungen sind die Bewegungen der Aethermolekeln alle der Welle parallel. Aber die Bewegung eines jeden fortgerückten Theilchens findet in der Elasticität des Mediums Widerstand, und diese Kraft wirkt im Allgemeinen schief gegen die Richtung der Verrückung. FRESNEL zeigt indess, dass die Verrückung in zwei Richtungen innerhalb der Ebene der Welle zerlegt werden könne, so dass die durch jede Componente in Wirkung tretende Elasticität die Resultante zweier Kräfte sein wird, von denen die eine in der Richtung der Verrückung selbst liegt, während die andere normal zur Welle steht. Die letztere kann nach dem Princip der Querschwingungen keine Wirkungen hervorbringen, und die erstere wird eine Welle entstehen lassen, welche mit constanter Geschwindigkeit fortgepflanzt wird. Er findet, dass diese beiden Richtungen die der grössten und kleinsten Durchmesser des mit der Ebene der Welle gemachten Schnittes der Elasticitätsfläche sind, und wenn die ursprüngliche Verrückung in zwei zerlegt wird, welche diesen parallel sind, so wird durch jede Componente eine ebene Welle entstehen, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch jenen Durchmesser repräsentirt wird, und die Schwingungen in jeder Welle werden constant dieselbe Richtung behalten.

Somit ergiebt sich, dass eine polarisirte ebene Welle innerhalb des Krystalles in zwei zerlegt werden wird, und diese werden mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortgepflanzt werden, und folglich verschiedene Wege nehmen.

Die Amplituden der zusammensetzenden Vibrationen verhalten sich wie die Cosinus der Winkel, welche die Richtung der ursprünglichen Vibration mit den beiden festen rechtwinkligen Richtungen macht, und da die Quadrate dieser Amplituden die Intensitäten der beiden Bündel repräsentiren, so ergiebt sich Malus Gesetz für diese Intensitäten als unmittelbare Folgerung [1]). Dagegen sind die zu diesen beiden Richtungen senkrechten Ebenen die Polarisationsebenen beider Bündel, und man kann leicht den Schluss ziehen, dass eine derselben den Winkel, welchen die beiden durch die zur Welle normal stehende Linie und durch die Normalen auf die kreisförmigen Abschnitte der Elasticitätsfläche gehenden Ebenen mit einander machen, in zwei Theile theilen muss, während die andere senkrecht gegen sie steht. Dieser Schluss stimmt nicht mathematisch mit Biot's Experimentalgesetz; aber die Differenzen liegen durchaus innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler, und die Resultate der Erfahrung müssen als Bestätigungen der Theorie angesehen werden.

Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer ebenen Welle nach irgend einer Richtueg bekannt ist, so kann die Gestalt der Wellenoberfläche, welche von irgend einem Punkte innerhalb des Krystalles sich verbreitet, gefunden werden. Denn wenn wir uns eine unendliche Menge ebener Wellen denken, welche beim Anfange der Zeit alle durch den Punkt gehen, welcher als Erschütterungsmittelpunkt angesehen wird, so wird die Wellenoberfläche diejenige sein,

---

1) Young scheint zuerst beobachtet zu haben, dass das Gesetz des Quadrates des Cosinus aus der Hypothese der Querschwingungen hergeleitet werden könne (*Encycl. Brit. Chromatics. p.* 161.) Die Bestätigung dieses wichtigen Gesetzes durch einen Versuch ist neuerlich von Arago der franz. Akademie vorgelegt worden, und er hat die praktischen Resultate dargelegt, welche aus diesem Gesetz für eine Anwendung auf Photometrie abgeleitet werden können. — Herschel „Vom Licht," franz. Uebers. Suppl. p 690. (Poggend. Ann. XXXV. p. 444.)

welche in irgend einem Augenblick von all diesen Ebenen berührt wird. Diese Fläche ist vom vierten Grade. FRESNEL hat ihre Gleichung, obwohl auf indirektem Wege, bestimmt, und gezeigt, dass sie geometrisch vermittelst eines Ellipsoides construirt werden könne, dessen halbe Axen gleich denen der Elasticitätsfläche sind. Da die Gestalt der Wellenoberfläche nun bekannt ist, so sind durch HUYGENS' Construktion die Richtungen der beiden gebrochenen Strahlen gegeben.

Aus der so eben angeführten Construktion ergiebt sich, dass es zwei Richtungen giebt, die Normalen nämlich auf die beiden kreisförmigen Abschnitte des Ellipsoides, in welchen die Geschwindigkeit beider Strahlen gleich ist. Diese Richtungen nennt FRESNEL die optischen Axen, obwohl er zuweilen mit diesem Ausdrucke die Normalen auf die kreisförmigen Abschnitte der Elasticitätsfläche, oder die Richtungen bezeichnet, in welchen eine ebene Welle mit ein und derselben Geschwindigkeit fortgepflanzt wird[1]). Es ergiebt sich also, dass die Krystalle im Allgemeinen zwei optische Axen haben, und deren nicht mehr haben können. Wenn zwei dieser drei hauptsächlichen Elasticitäten einander gleich sind, so fallen die beiden optischen Axen zusammen, und die Wellenoberfläche verwandelt sich von selbst

1) NEUMANN in Königsberg hat (POGGEND. Ann. XXXIII. p. 257.) in einer sehr klaren Abhandlung den Unterschied der Phase der mit einander interferirenden Strahlen, welche durch ein Krystallblättchen gegangen sind, genau gefunden, und aus seiner Formel folgt, dass die scheinbaren optischen Axen, für welche der Phasenunterschied Null ist, von Strahlen erzeugt werden, deren Wellenebenen parallel mit den Kreisschnitten der Elasticitätsfläche sind, und deshalb müssen die Normalen dieser Schnitte die wahren optischen Axen genannt werden. Er beschäftigt sich dann noch genauer mit der Theorie der Farbenerscheinungen zweiaxiger Krystalle für den Fall des schiefen Durchganges der Lichtsrahlen, und findet die resultirenden Intensitäten annäherungsweise in so allgemein gültigen Ausdrücken, dass sie auf jede durchsichtige Substanz angewendet werden können. A. d. Ü.

in die Kugel und das Umdrehungssphäroid. Es zeigt sich also die Gestalt der Welle in einaxigen Krystallen, welche HUYGENS als die natürlichste annahm, als ein simples Corollar aus FRESNEL's allgemeiner Theorie. Wenn endlich alle drei Elasticitäten einander gleich sind, so wird die Wellenoberfläche eine Kugel; die Geschwindigkeit ist demnach nach allen Richtungen dieselbe, und das Brechungsgesetz reducirt sich auf das bekannte Gesetz von SNELLIUS.

Es war leicht, aus der allgemeinen Construktion die Folgerung nachzuweisen, dass der Unterschied der Quadrate der reciproken Geschwindigkeiten beider Strahlen in zweiaxigen Krystallen dem Produkte aus den Sinus der Winkel proportional ist, welche ihre gemeinschaftliche Richtung innerhalb des Krystalles mit beiden Axen macht, so dass das merkwürdige Gesetz BREWSTER's und BIOT's nun zu ein und derselben Theorie gehört. Aber es ergab sich ferner aus dieser Theorie, dass die Geschwindigkeit keines dieser Strahlen constant sei, und dass die Brechung beider nach einem neuen Gesetze vor sich geht. Dieser Schluss widersprach allen überkommenen Bemerkungen über diesen Gegenstand, und wirklich schienen BIOT's Untersuchungen über den wasserklaren Topas [1]) seine Annahme, dass die Brechung eines der Strahlen dem gewöhnlichen Gesetze der Sinus folge, zu rechtfertigen. Es wurde daher eine Sache von höchstem Interesse, diese Frage durch genaue Versuche zu entscheiden. Dies geschah von FRESNEL selbst durch die gewöhnliche Methode der prismatischen Refraktion, so wie durch die feineren Hülfsmittel, welche die Verrückung der Brechungsfransen darbot, und das Resultat war in beiden Fällen zu Gunsten seiner Theorie entscheidend. Die numerischen Daten, welche BIOT's Beobachtungen über den Topas ergaben, setzten FRESNEL in den Stand, nach den Principien jener Theorie die Geschwindigkeit des Strahles nach verschiedenen Richtungen zu bestimmen, und die beob-

1) *Mém. Inst. tom. III.*

achtete Abweichung fand sich mit der berechneten übereinstimmend.

Das Phänomen der Zerstreuung bei einfach brechenden Substanzen beweist, dass die Elasticität des vibrirenden Mediums sich mit der Wellenlänge ändert. Dasselbe muss bei doppelt brechenden Medien statt finden, in welchen die Elasticität nach verschiedenen Richtungen verschieden ist, und da wir keinen Grund haben anzunehmen, die Elasticitäten müssten sich in der Richtung der drei Elasticitätsaxen in demselben Verhältniss ändern, so folgt, dass im Allgemeinen jeder Brechungsindex sein zugehöriges Zerstreuungsverhältniss haben wird. BREWSTER zeigte zuerst, dass dies wirklich der Fall sei, und dass Doppelspath und andere doppeltbrechende Substanzen zwei zerstreuende Kräfte haben [1]. RUDBERG hat neuerlich die Gesetze der Brechung des farbigen Lichtes in doppeltbrechenden Medien mit grosser Sorgfalt untersucht, und dabei die genaue Methode FRAUNHOFERS angewendet. Er hat auf diese Weise den grössten und kleinsten Brechungsindex für die sieben hauptsächlichsten dunkeln Linien des Spektrums von Doppelspath und von Bergkrysll, so wie die hauptsächlichsten Indices für Arragonit und Topas bestimmt; und er hat in Uebereinstimmung mit BREWSTER's Entdeckung gefunden, dass das Verhältniss dieser Indices mit der Brechbarkeit des Lichtes stieg [2]. RUDBERG's Versuche bestätigen

---

1) *Treatise on new philosophical instruments. Edinb.* 1813.

2) *Annales de Chimie, tom XLVIII.* (POGGEND. Annal. XIV. p. 55. XVII. p. 2.) Zur Berechnung der Phänomene der doppelten Brechung in zweiaxigen Krystallen, ist es nach FRESNEL's Theorie nöthig, das Gesetz der drei Haupt-Brechungsindices, oder die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Strahlen, deren Vibrationen parallel den drei Elasticitätsaxen sind, zu kennen. Ausser RUDBERG's Untersuchungen wüsste ich nicht, dass wir irgend etwas besässen, worin alle diese Daten direkt bestimmt worden wären. Zwar kann, wenn wir den grössten und kleinsten Index und den von den optischen Axen eingeschlossenen Winkel kennen, der mittlere Index berechnet werden; aber die Neigung der optischen Axen kann auf experimentellem Wege nicht mit derselben Genauigkeit bestimmt werden, als die übrigen Elemente.

ferner die Grundlage der FRESNEL'schen Theorie, nämlich dass die Geschwindigkeit eines Strahles in einem gegebenen Medium so lange dieselbe bleibt, als seine Polarisationsebene nicht geändert wird.

Der von den optischen Axen eingeschlossene Winkel ist bei zweiaxigen Krystallen eine einfache Funktion aus den drei Hauptelasticitäten; und wenn ihr Verhältniss sich mit der Farbe des Lichtes ändert, so muss sich die Neigung der Axen gleichfalls ändern. Aus JOHN HERSCHEL'S Beobachtungen hat sich solche Aenderung ergeben, und er fand, dass die Neigung der Axen für einige Krystalle grösser sei im rothen, als im violetten Lichte, während sie in anderen geringer ist [1]). Beim Rochelle-Salz (weinsteinsaures Kali und Natron) beträgt der Winkel zwischen den optischen Axen der rothen und violetten Strahlen 10°. Im Allgemeinen ist die Lage der drei Elasticitätsaxen unveränderlich, und die optischen Axen sind für alle Farben auf Eine Ebene beschränkt; aber JOHN HERSCHEL beobachtete unlängst, dass im Borax die optischen Axen, welche zu verschiedenen Farben gehören, in verschiedenen Ebenen liegen, und wir sind zu dem Schlusse berechtigt, dass die Richtung der Elasticitätsaxen in diesen und wahrscheinlich vielen andern Krystallen sich mit der Farbe ändert [2]).

---

1) *Phil. Trans.* 1820.

2) Von NEUMANN, POGGENDORFF und NOERRENBERG in Tübingen sind Beobachtungen noch andrer zwei- und eingliedriger Krystalle, wie Gyps, Adular, Diopsid, kekannt gemacht. (POGGEND. Ann. XXXV. p. 81. 203. 380.) Die Ringsysteme beider Axen waren auffallend verschieden (was am Diopsid schon von BIOT beobachtet worden war), und bewährten die HERSCHEL'schen Beobachtungen. Beim Gyps bestätigte sich die Verschiedenheit in der Weise, dass nicht nur, wie MITSCHERLICH gefunden hatte, sich beide Axen bei erhöheter Temperatur vereinigen, sondern sie dies auch mit verschiedenen Geschwindigkeiten thun, indem die eine sich beinahe halbmal schneller bewegt, als die andere. Uebrigens, sagt NEUMANN, scheinen diese unsymmetrischen Phänomene ohne Zusammenhang mit der FRESREL'schen Theorie, ja ihr selbst widersprechend.

Die erste Erweiterung der FRESNEL'schen Theorie geschah von AMPERE. Die dahin gehörigen Resultate sind in

---

Auch MILLER hat sich bemüht, ein Gesetz anfzufinden, wonach die Lage der beiden Axen, zu denen die dritte senkrecht steht, von der Krystallform abhängig gemacht werden könnte. Er sagt (*Fourth Report of the Brit. Assoc. p.* 556): „Nachdem ich die Lagen der Elasticitätsaxen in einer Menge zwei- und eingliedriger Krystalle gefunden hatte, prüfte ich die Hypothese, auf welche NEUMANN bei seinen Beobachtungen am Gyps gekommen war (POGGEND. Ann. XXVII. p. 240.), nämlich, dass die Krystallflächen auf die Elasticitätsaxen wie auf krystallographische bezogen werden können, fand sie aber nur in einem einzigen Falle bestätigt. Bei vielen andern Krystallen konnte keine andere Beziehung zwischen der Gestalt und den Elasticitätsaxen aufgefunden werden. Nur im Feldspath, Epidot und Diopsid, und nach NOERRENBERG'S Beobachtungen im chromsauren Blei fallen besagte Elasticitätsaxen sehr genau mit der Axe einer der Hauptzonen des Krystalles zusammen." Und ferner (*Trans. of the Cambr. Phil. Soc. V. pt. III.* POGGEND. Ann. XXXVII. p. 366): Im prismatischen Systeme fallen die Elasticitätsaxen mit den rechtwinkligen Krystallaxen zusammen. Im hemiprismatischen ist von den 3 Krystallaxen die jenige, welche senkrecht zu den beiden andern steht, immer eine der Elastitätsaxen. Beim Gyps, in ungewöhnlicher Lufttemperatur, und bei vielen andern Krystallen ist diese die mittlere oder die auf die optischen Axen senkrechte Axe. Beim Borax, essigsaurem Natron, beim Feldspath, der Weinsäure, beim Gyps in einer Temperatur von 100° C (nach MITSCHERLICH) ist es die grösste oder kleinste Elasticitätsaxe, und hier liegt sie daher mit den optischen Axen in Einer Ebene, und macht gleiche Winkel mit ihnen. „Da die Lage der einen Elasticitätsaxe sonach eine augenscheinliche Beziehung zur Krystallgestalt besitzt, so fragt es sich natürlich, ob sich nicht zwischen den beiden andern Elasticitätsaxen und der Krystallform auch irgend eine Beziehung auffinden lasse. Die einzigen Versuche zur Auffindung solcher Beziehungen sind von SORET und NEUMANN. Dieser zeigt (POGGEND. XXVII. p. 240) dass im Gyps die 3 Elasticitätsaxen und auch die thermischen Axen (die Linien, welche bei allen Temperaturen rechtwinklig auf einander bleiben) ein System von rechtwinkligen Krystallaxen ausmachen. Es scheint zuerst nicht unwahrscheinlich, dass man eine ähnliche Relation zwischen der Form und den Elasticitätsaxen auch bei andern hemiprismatischen Krystallen finden werde. Indess scheinen meine Beobachtungen

zwei kurzen Abhandlungen enthalten, welche er 1828 in der franz. Akademie las, seitdem zu einem Aufsatze vereinigte, und in den *Annales de Chimie* abdrucken liess [1]). FRESNEL fand die Formel für alle Berührungsebenen der Wellenoberfläche, und zeigte, auf welche Weise die Gleichung dieser Oberfläche selbst wohl durch Differentiation und Elimination daraus abgeleitet werden könnte. Er schien indess der Meinung gewesen zu sein, dass dieser direkte Process mit verwickelten und unauflöslichen Rechnungen verknüpft sei. Er suchte daher nur seine Gleichung zu verificiren, was er durch nicht vollkommen strenge Räsonnements that, so wie dadurch, dass er (durch Berechnungen, welche er zu langweilig fand, um sie mitzutheilen) bewies, dass sie den bereits bezeichneten Bedingungen entspreche. AMPERE hat die direkte Beweisführung gegeben, und die Gleichung der Wellenoberfläche in der ursprünglich von FRESNEL angegebenen Art und Weise abgeleitet. Aus dieser Gleichung hat er dann die schöne geometrische Construktion gefolgert, welche FRESNEL gegeben und indirekt erhalten hatte.

Ein sehr kurzer Beweis desselben Theorems, so wie anderer Hauptpunkte der FRESNEL'schen Theorie wurde bald darauf von M'CULLAGH gegeben [2]). Dieser Schriftsteller hat gezeigt, dass sowohl die Grösse als die Richtung der resul-

---

dem so vermutheten Gesetze zu widersprechen, wiewohl sie auch kein anderes an die Stelle desselben setzen. Die einzige allgemeine Thatsache, welche ich beobachtet habe, ist: dass in vielen, aber nicht in allen Fällen, eine der beiden Elasticitätsaxen, welche senkrecht stehen, auch die Axe einer der Hauptzonen des Krystalles ist.“ A. d. Ü.

1) *Mémoire sur la détermination de la surface courbe des ondes lumineuses etc. tom XXXIX.* (POGGEND. Ann. XXX. p. 262.)

2) „*On the double Refraction of Light in a crystallized medium according to the principles of* FRESNEL.“ *Transactions of the Royal Jrish Academy, vol. XVI.* Eine fernere Entwikkelung der Principien dieser Abhandlung sind unlängst von demselben Verfasser im 17ten Theile derselben *Transactions* unter dem Titel: „*Geometrical propositions applied to the wave-theory of Light,*“ gegeben worden.

tirenden elastischen Kraft, welche durch irgend eine Verrückung hervorgerufen wird, durch ein Ellipsoid dargestellt werden kann, dessen halbe Axen die drei Haupt-Brechungsindices des Mediums sind; und aus diesem Ellipsoide hat er vermittelst weniger geometrischer Lehrsätze in klarer und einfacher Weise die hauptsächlichsten, von Fresnel gefundenen Resultate hergeleitet. Die Axen des Ellipsoides fallen in der Richtung mit den Axen des Fresnel'schen Ellipsoides zusammen, und sind ihnen umgekehrt proportional. M'Cullagh hat die Richtigkeit der Fresnel'schen Construktion für die Wellentheorie mit Hülfe einer einfachen geometrischen Relation zwischen ihren Berührungsebenen und den Abschnitten beider Ellipsoiden bewiesen.

Im dritten Supplement seines „*Essay on the Theory of Systems Rays*“ [1]) hat Hamilton denjenigen Theil der Fresnel'schen Theorie, welcher sich auf das Fundamental-Problem der Bestimmung der Geschwindigkeit und der Polarisation einer ebenen Welle bezieht, in einer sehr eleganten analytischen Form dargelegt; und aus der Geschwindigkeit und Richtung der Welle leitet er die des Strahles, und daher die Gestalt der Wellenoberfläche vermittelst der allgemeinen Relationen ab, welche ihm bei seiner Ansicht der mathematischen Optik zu Gebote standen.

In diesem Systeme, von welchem der Autor bei der letzten Zusammenkunft der Britischen Naturforscher eine Skizze gab, sind die Gesetze der gewöhnlichen und ungewöhnlichen Reflexion und Refraktion in zwei Grundausdrücken enthalten, welche sagen, dass die partiellen Differentialcoefficienten der ersten Ordnung einer gewissen Funktion, zwischen zwei Grenz-Coordinaten in der Ebene genommen, welche die reflektirende oder brechende Fläche am Einfallspunkte berührt, nicht durch Reflexion oder Brechung verändert werden. Die hier betrachtete Funktion ist die charakteristische Funktion des Autors, deren partikulare Form als das op-

1) *Transactions of the Royal Irish Academy, vol. XVII.*

tische System charakterisirend betrachtet werden kann, und von deren Eigenschaften, wie er findet, alle Probleme der mathematischen Optik abhängig gemacht werden können. Nach den Principien der Wellentheorie ist diese Funktion gleich der Undulationszeit für die Fortpflanzung des Lichtes von irgend einem angenommenen Punkte zu einem anderen in demselben oder in verschiedenen Medien; und die so eben erwähnten Ausdrücke bezeichnen nur, dass die Componenten der normalen Trägheit (*slowness*) der Welle, welche parallel der Trennungsebene sind, oder dass die Reciproke der Geschwindigkeit der Wellenfortpflanzung, nach der Richtung dieser Oberfläche zerlegt, nicht durch Reflexion oder Refraktion verändert werden. Die normale Trägheit der Wellenfortpflanzung ist nun von der äussersten Wichtigkeit zur Begründung dieser Theorie; und wenn ihre Grösse durch eine Linie in der Richtung derselben dargestellt wird, so erhält man für ihren Ausdruck eine gekrümmte Fläche, welche nach Fresnel's Principien sich als die Fläche zweier Coordinat-Ebenen findet, durch eine merkwürdige Relation der Reciprocität mit der Wellentheorie in Zusammenhang stehend. Wenn diese Relation mit den so eben erwähnten Reflexions- und Refractionsgesetzen combinirt wird, so führt sie zu einer sehr eleganten Construktion für den reflektirten oder gebrochenen Strahl, welche in den meisten Fällen bequemer ist, als die Huygens'sche. Wenn also ein Strahl von Luft in Krystall geht, so haben wir nur die Oberflächen der Wellenträgheiten für zwei Medien zu construiren, welche zugleich ihren gemeinschaftlichen Mittelpunkt im Einfallspunkte haben. Man lasse nun den einfallenden Strahl auf die Kugel treffen, welche die normale Trägheit der Welle in der Luft repräsentirt, und ziehe vom Sektionspunkte eine senkrechte auf die reflektirende oder brechende Fläche. Diese wird die Fläche der Trägheit der reflektirten oder gebrochenen Wellen im Allgemeinen in zwei Punkten schneiden. Die Linien, welche diese Punkte mit dem Mittelpunkte verbinden, werden die Richtung und die

normale Trägheit der Wellen repräsentiren, während die Senkrechten vom Mittelpunkte auf die Tangentialebenen in denselben Punkten die Richtung und Trägheit der Strahlen selbst repräsentiren werden.

Diese wichtige krumme Fläche bot sich ebenfalls CAUCHY bei seinen schönen Untersuchungen über die Fortpflanzung der Wellen in elastischen Medien dar, obwohl er nicht auf alle ihre Eigenschafteu Acht gehabt zu haben scheint. Die Eigenschaften eben dieser Fläche, und ihre Anwendung zur Construktion der Richtung eines reflektirten oder gebrochenen Strahles wurden ganz unabhängig auch von M'CULLAGH entdeckt, welcher sie unlängst auf die geometrische Entwickelung der Theorie der doppelten Brechung angewendet hat [1]).

Die Relationen zwischen der Fläche der Wellenträgheit und der der Welle führten HAMILTON zur Entdeckung einiger neuer geometrischen Eigenschaften letzterer. Diese Eigenschaften sind mit Hülfe gewisser Umformungen der Gleichung der Wellenoberfläche bewiesen, und es ist gezeigt worden, dass diese Fläche vier conoidische Scheitel oder Hörner (*cusps*) an den Enden der Linien der einzelnen Strahlgeschwindigkeit hat, an deren jedem die Welle berührt wird, nicht durch zwei Ebenen, wie FRESNEL annahm, sondern durch eine unendliche Menge, welche einen Tangentialkegel vom zweiten Grade bilden, während es an den Enden der Linien der einzelnen Strahlgeschwindigkeit vier Kreise ebner Berührung giebt, und in jedem Punkte jedes desselben wird die Wellenoberfläche von einer einzelnen Ebene berührt. Diese merkwürdigen Eigenschaften haben HAMILTON dazu vermocht, zwei neue Brechungsgesetze zu anticipiren, von ihm kegelförmige Brechung genannt, weil in jedem Falle ein einzelner Strahl in eine unendliche Menge Strahlen ge-

---

1) *„Geometrical propositions applied to the wave-theorie of Light." Transactions of the Royal Jrish Academy, vol. XVII.*

brochen wird, welche eine Art von Kegel bilden. Aeussere kegelförmige Brechung entspricht dem Scheitel oder Horn auf der Wellenoberfläche, und findet ausserhalb statt, wenn ein einzelner innerer Strahl mit jeder der Linien der einzelnen Strahlgeschwindigkeit zusammenfällt. Innere kegelförmige Brechung dagegen findet innerhalb des Krystalles statt, wenn aussen ein einzelner Strahl unter einem Winkel auffällt, welcher der Linie der einzelnen Wellengeschwindigkeit innerhalb entspricht. In diesem letzteren Falle werden, wenn der Krystall durch parallele Flächen begrenzt ist, alle Strahlen des Kegels aus der zweiten Fläche parallel mit dem auf die erste fallenden Strahl heraustreten, so dass sie einen kleinen elliptischen Cylinder bilden, dessen Grösse von dem Winkel des Kegels und der Dicke des Krystalles abhängen wird. Alle diese merkwürdigen Schlüsse sind auf das Vollständigste durch den Versuch bestätigt worden [1]).

Ich werde nun zu einem kurzen Bericht über die Arbeiten Cauchy's in diesem interessanten Felde der Analysis übergehen. Die Untersuchungen dieses ausgezeichneten Mathematikers über die Fortpflanzung der Bewegung in elastischen Medien, sind in verschiedenen Lieferungen der *Exercises de Mathematiques* verstreut, und er hat eine schätzbare Zusammenstellung der Resultate dieser Untersuchungen, so weit sie die Wellentheorie des Lichtes betreffen, in einem 1830 in der franz. Akademie gelesenen Memoire gegeben [2]).

Nachdem Cauchy die allgemeinen Gleichungen für die Bewegung eines Systemes von Molekeln, auf einander durch anziehende oder abstossende Kräfte wirkend, welche sich nach irgend einer Funktion der Entfernung ändern, angegeben hat, so bemerkt er, dass es nicht nothwendig sei, seine Zuflucht zu ihren allgemeinen Integralen zu nehmen, um

---

1) *„On the Phenomena presented by Light in its passage along the axes of biaxal Crystalls.“ Ibid.* (Vom Verfasser.) (Poggend. Ann. XXVIII. p. 91.)

2) *„Mémoire sur la théorie de la lumière.“ Mém. Inst., tom. X.*

die Gesetze der undulatorischen Fortpflanzung zu bestimmen. Wirklich reicht es hin, das Fortpflanzungsgesetz einer ebenen Welle zu kennen. Denn wenn wir eine grosse Anzahl ebener Wellen betrachten, welche unter kleinen Winkeln gegen einander geneigt sind, und welche anfangs in der Nähe des Punktes, welcher als Störungsanfangspunkt betrachtet wird, über einander lagen, so können die Vibrationen in den elementaren Wellen, welche durch jede derselben entstehen, als zu klein angenommen werden, als dass sie einzeln den Sinn afficirten, und diese Wellen werden nur durch Uebereinanderlagerung wirksam. Folglich wird die allgemeine Wellenoberfläche der Ort aller derjenigen Punkte sein, in welchen die elementaren ebenen Wellen über einander liegen, und sie wird daher die von all diesen in irgend einem Augenblick berührte Oberfläche sein [1]). Daher ist das Problem auf die Bestimmung des Fortpflanzungsgesetzes einer ebenen Welle reducirt.

CAUCHY zeigt dann, dass eine ursprünglich auf eine gegebene Ebene beschränkte Störung im Allgemeinen Veranlassung zur Entstehung von drei Paar, der ursprünglichen Ebene parallelen, und mit gleichförmigen Geschwindigkeiten fortgepflanzten Ebenen Veranlassung giebt, wo sich denn die beiden Ebenen eines jeden Paares mit gleicher Geschwindigkeit nach entgegengesetzten Richtungen bewegen. Er beweist, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der einzelnen Paare durch die Reciproken der Axen eines gewissen Ellipsoides dargestellt werden können, dessen Gestalt von der Lage der ebenen Welle und von der Beschaffenheit des Systemes abhängt; und die absoluten Verschiebungen der Molekel werden den Richtungen dieser Axen parallel sein.

---

1) POISSON lässt diese Vorstellung der Wellenoberfläche nicht gelten, und er glaubt, dass eine unendliche Menge ebener Wellen, welche am Ursprung der Bewegung einen kleinen Theil gemein haben, nicht den anfänglichen Zustand eines in diesem Punkte gestörten Mediums darstellen könne.

Demnach wird ein System ebener Wellen, das zuerst am Störungsanfangspunkte übereingelagert war, in drei correspondirende Systeme getheilt werden, und diese werden durch ihre Uebereinanderlagerung eine krumme Fläche von drei Coordinat-Ebenen erzeugen, und jede Ebene wird von allen ebenen Wellen desselben Systemes berührt werden. Aus diesen Principien folgt, dass ein einzelner Lichtstrahl im Allgemeinen in drei polarisirte Strahlen zertheilt werden wird (indem ein Strahl nach dieser Theorie einer gewissen Linie oder Ebene parallel polarisirt genannt wird, wenn die Vibrationen der Aethermolekeln dieser Linie oder Ebene parallel sind). Cauchy giebt die genaue physische Bedingung nicht an, von welcher die Existenz des dritten Strahles abhängt. Es möchte indess scheinen, als müsse er von dem Umstande herrühren, dass die zur Welle normale Vibration nicht durchaus unbemerkbar ist, oder dass die wirklichen Vibrationen nicht genau in der Ebene der Welle statt finden. Er sagt, dass die Intensität dieses Strahles in jedem Falle sehr gering sein wird, und dass seine Beobachtung deshalb von grosser Schwierigkeit sein müsse; aber er verspricht, in einer künftigen Mittheilung die Mittel anzugeben, wie sein Vorhandensein deutlich gemacht werden könne [1]).

Die Formeln, von welchen die Lösung des allgemeinen Problems abhängt, können so weit reducirt werden, dass sie neun

---

1) Neumann hat fast zu gleicher Zeit mit Cauchy eine Arbeit bekannt gemcht, welche auf gleichem Ausgange beruhend, auch zu denselben Resultaten führt, nachdem das Theorem auf die Untersuchung der Wellenfläche von Einem Erschütterungspunkte aus reducirt ist. Auch hier ist die Definition der Polarisationsebene mit der Fresnel'schen im Widerspruch, ja es wird sogar der Beweis, welcher für diese von Fresnel gegeben ist, als auch für diese Biot'sche sprechend erkannt. — Der fragliche dritte Strahl mag sich nach N. vielleicht als strahlende Wärme oder irgend ein anderes Agens wirkend ergeben. (Poggend. Ann. XXV. p. 418.) A. d. Ü.

neun constante Coefficienten enthalten, welche vom Gesetze der Vertheilung der Molekel durch den Raum abhängen. Drei derselben repräsentiren den Druck, welchen irgend drei Ebenen, denen der drei Coordinaten parallel, im natürlichen Zustande des Mediums erleiden; und diese, schliesst CAUCHY später, verschwinden von selbst. Wenn die allgemeine Theorie auf den Fall angewendet wird, in welchem die Elasticität nach allen Richtungen um irgend eine Linie, welche einer der Coordinatenaxen parallel ist, dieselbe ist, so findet CAUCHY, dass die neun Coefficienten auf fünf reducirt werden; und dass zwei Coordinat-Ebenen der Wellenoberfläche die Kugel und das Späroid des HUYGENS'schen Gesetzes werden, vorausgesetzt, dass die übrigen Constanten zwei angegebenen Bedingungsgleichungen genügen. In dem allgemeinen Falle, in welchem die Elasticität nach allen Richtungen ungleich ist, untersucht er die Schnitte der Wellenoberfläche mit den Ebenen der drei Coordinaten; und er findet, dass sie für zwei Coordinat-Ebenen dieser Oberfläche auf den Kreis und die Ellipse der FRESNEL'schen Theorie reducirt werden, vorausgesetzt, dass die Constanten drei angegebene Bedingungsgleichungen erfüllen. Die Wellenoberfläche selbst weicht ein wenig von der von FRFSNEL erhaltenen Fläche des vierten Grades ab; aber sie lässt sich auf diese zurückführen, wenn die Excentricitäten der so eben erwähnten Ellipsen klein sind, wie es bei allen bekannten Krystallen der Fall ist.

Also umfassen und bestätigen die von CAUCHY erhaltetenen Resultate die FRESNEL'schen, und die mathematischen Gesetze der Fortpflanzung des Lichtes sind als besondere Fälle der allgemeineren Gesetze der Fortpflanzung schwingender Bewegung in irgend einem Medium, das aus einander anziehenden und abstossenden Molekeln besteht, erwiesen. Indessen nur in Rücksicht auf die Theorie des Lichtes betrachtet, kann, wie ich glaube, die von CAUCHY gegebene Lösung als eine vollständige physikalische Lösung betrachtet werden. Mit andern Worten: die Erscheinungen

des Lichtes sind nicht direkt mit irgend einer gegebenen physikalischen Hypothese verknüpft; aber es ist gezeigt worden, dass sie in den Resultaten der allgemeinen Theorie einbegriffen sind, vermöge gewisser angenommener Relationen unter den Constanten, welche diese Theorie involvirt. In der That, wenn wir im Stande wären, den genauen physikalischen Sinn dieser Bedingungsgleichungen anzugeben, so könnten wir für die allgemeine Theorie nichts weiter verlangen; denn diese Gleichungen müssen nothwendig die charakteristischen Eigenschaften des schwingenden Mediums ausdrücken. Aus diesem Gesichtspunkte wird ihre Diskussion ein Gegenstand vom höchsten Interesse, und es ist wahrscheinlich, dass die wichtigen Schlüsse, von welchen wir jetzt noch zu sprechen haben, auf diese Weise bestätigt und ausgedehnt werden können.

Diese Schlüsse sind in einem, der franz. Akademie im Frühling dieses Jahres von Lame vorgelegten Memoire enthalten. In demselben hat der Verfasser versucht, die Gesetze zu bestimmen, nach welchen die Molekeln der Körper auf die des Aethers, und die des Aethers auf einander wirken. Indem er von dem Vorhandensein der Querschwingungen ausgeht, als begründet durch das Faktum der Nicht-Interferenz entgegengesetzt polarisirter Strahlen, nimmt der Verfasser an, es finde eine Störung des Aethers im Vacuum statt, das heisst in einem, von aller wägbaren Materie leeren Raum, und betrachtet dann, was das Resultat sein werde, wenn diese Störung den in einem durchsichtigen Körper enthaltenen Aether erreicht. Lame nimmt nun die von Fresnel angeführte, und genauer von Poisson dargestellte Eigenthümlichkeit der Querschwingungen an, nämlich, dass sie fortgepflanzt werden, ohne die geringste Aenderung in der Dichtigkeit zu bewirken, und sucht dann die Bedingungen, denen die Funktion, welche die gegenseitige Wirkung der Aethermolekeln und derer des festen Körpers repräsentirt, genügen muss, damit diese Eigenschaft vorhanden sein könne. Indem er

demnach dies Princip in die partiellen Differentialgleichungen einführt, welche die Gesetze der vibratorischen Bewegung im Allgemeinen ausdrücken, kommt er zuletzt zu einer Bedingungsgleichung, aus welcher er folgert, dass „die Wirkung der wägbaren Materie auf den Aether sich umgekehrt, wie das Quadrat der Entfernung verhält, und dass die Elasticität des Aethers selbst seiner Dichtigkeit proportional ist.“

Um das Zeichen dieser Wirkung zu bestimmen, d. h. ob sie attraktiv oder repulsiv ist, wird es nothwendig, die Differentialgleichungen zu integriren. Nach gewissen Umformungen dieser Gleichungen, um ihre Untersuchung zu erleichtern, erhält er ihr Integral für den Fall eines einzelnen sphärischen und homogenen Molekels des Körpers, um welchen der Aether in kugelförmigen Hüllen herumliegt. Durch die Combination der aus diesem Falle hergeleiteten Schlüsse mit dem ausgemachten Faktum, nämlich dass die Geschwindigkeit des Lichtes im durchsichtigen Körper geringer ist, als im Vacuum, erhält er das Resultat, dass die mittlere Dichtigkeit des Aethers im ersteren geringer sei, oder dass die Wirkung der Molekeln dieser Körper auf die des Aethers eine repulsive sei. LAME schliesst ferner aus der Untersuchung dieses Falles, dass die Verzögerung der vibratorischen Bewegung beim Eindringen in einen dichten Körper um so grösser sein werde, je kleiner die Wellenlänge ist; so dass die Brechung für Wellen von geringerer Länge bedeutender sein werde. Diess hält er für die richtige Erklärung des Phänomens der Dispersion.

Ebenso hat LAME sich bemüht, die Phänomene der doppelten Brechung mit einer vorausgesetzten Beschaffenheit des Aetherfluidums in Zusammenhang zu bringen. Er betrachtet den Fall, in welchem der Aether als um die Molekel des Körpers in ellipsoidischen Hüllen von ein und demselben Brennpunkte gelagert angenommen ist, und er schliesst, dass eine vibrirende Bewegung, welche sich vom Vacuum bis in einen so beschaffenen Körper fortpflanzt, bei ihrem Eintritte in zwei componente Bewegungen zerlegt

werden wird, welche mit verschiedenen Geschwindigkeiten fortschreiten werden. Er findet, dass beide componente Vibrationen rechte Winkel mit einander machen, und den Linien der grössten und kleinsten Krümmung der elementaren Ellipsoiden parallel sein werden. Somit ist die Spaltung eines Lichtstrahles beim Eintritt in ein krystallisirtes Medium, und die entgegengesetzte Polarisation beider Bündel als mit solcher molekularen Beschaffenheit, wie wir beschrieben haben, vereinbar erwiesen.

Diese Resultate sind vom höchsten Interesse, und werden ohne Zweifel bald von denen, welche sich mit demselben Theile der Analysis befassen, auf's Neue untersucht werden. Ihr Autor scheint überzeugt zu sein, dass seine Methoden ihn zu den mathematischen Gesetzen anderer Erscheinungen führen werden, welche er auf gleiche Weise von den Bewegungen des ätherischen Fluidums abhängig glaubt [1]).

Ich kann diesen Abschnitt nicht beschliessen, ohne die Phänomene der Absorption krystallisirter Media zu erwähnen, obwohl die Gesetze dieser Phänomene bis jetzt noch ganz ausserhalb des Gebietes der Theorie liegen. WOLLASTON scheint der erste gewesen zu sein, welcher einige Thatsachen bekannt machte, die mit diesem interessanten Gegenstande zusammenhängen. Es fand sich, dass das Absorptionsvermögen nach den Richtungen verschieden sei;

---

1) In einer Fortsetzung dieses Memoires, unlängst vor der franz. Akademie gelesen, hat LAME in's Besondere die Art von Vibration der Aethertheilchen betrachtet, welche um die wägbaren Theilchen des Körpers in concentrischen Hüllen von abnehmender Dichtigkeit liegen. Durchsichtige homogene Körper bestehen, der Annahme nach, aus einer Menge solcher gleichförmig im Raume verstreuter Theilchen, deren Entfernungen ohne Vergleich grösser sind, als ihre Durchmesser, und er glaubt, dass die von den an der Austrittsfläche anliegenden Theilchen sich fortpflanzenden Wellen durch ihre Interferenz ähnliche Phänomene bewirken werden, wie die festen Linien im Spektrum. *Annales de Chimie tom. LVII.*

einige Krystalle von Palladium z. B. schienen von tiefrother Farbe, wenn man sie nach ihrer Axe betrachtete, und von einem gelblichen Grün bei einer Querrichtung. Man beobachtete, dass auch Turmaline analoge Eigenschaften besitzen [1]). Aehnliche Beobachtungen wurden später von Cordier und dem Grafen von Bournon gemacht.

Den nächsten Schritt von Wichtigkeit in diesem neuen Felde der Untersuchung that David Brewster. Er beobachtete, dass in einigen doppeltbrechenden Krystallen, wie im kohlensauren Baryte (Witherit), beide Bündel verschieden gefärbt waren [2]), während in anderen ihre Intensität sehr verschieden war. Die ungleiche Absorption beider Bündel ist am merkwürdigsten beim Turmalin, bei welchem sie fast zu gleicher Zeit von Biot und Seebeck beobachtet wurde. Ersterer schloss aus den Erscheinungen, dass die brechenden Strahlen des Spektrums leichter von dem Minerale absorbirt würden, wenn sie ihrer Axe parallel, als wenn sie senkrecht dagegen polarisirt sind [3]).

David Brewster, welchen wir den grössten Theil unseres Wissens von diesem Gegenstande verdanken, hat gezeigt [4]), dass sich ähnliche Eigenschaften in höherem oder geringerem Grade bei den meisten gefärbten Substanzen finden, welche doppelte Brechung besitzen, und dass die Lichtabsorption durch solche Media sich im Allgemeinen sowohl mit der Farbe des Lichtes, als mit der Lage der Polarisationsebene ändert. Wenn daher ein Strahl gewöhnlichen Lichtes in eine Platte von solchem Krystalle eintritt, so werden beide Bündel, in welche er getheilt wird, ungleich absorbirt werden, und das austretende Licht wird zum Theil

---

1) *Phil. Trans.* 1804.
2) *Phil. Trans.* 1814.
3) *Traite de Physique, tom. IV*, 313.
4) „*On the Laws, which regulate the Absorption of Polarized Light by double refracting Crystalls.*“ *Phil. Trans.* 1829. (Gilbert's Ann. LXV. 4.; Gehler's Wörterbuch VII. 2te Abth. p. 867 im Auszuge.)

polarisirt sein; dabei wird die Differenz der Intensitäten der entgegengesetzt polarisirten Theile mit der Dicke des durchlaufenen Mediums zunehmen. Aber beide Bündel sind im Allgemeinen sowohl an Farbe, als an Intensität verschieden, und BREWSTER fand, dass diese Verschiedenheit bei einaxigen Krystallen vom Neigungswinkel des Strahles gegen die Axe abhänge, und ein Maximum werde, wenn er senkrecht zu ihr steht. Ein Strahl gewöhnlichen Lichtes wird daher, wenn er senkrecht durch eine Platte eines solchen Krystalles geht, gefärbt heraustreten, und die hervorgehende Farbe wird im Allgemeinen sich mit der Neigung der Oberfläche gegen die Axe ändern. Also sind die von WOLLASTON und Anderen beobachteten Phänomene des Dichroismus auf die allgemeineren Gesetze der Absorption zurückgeführt. Analoge Eigenschaften besitzen die zweiaxigen Krystalle, und diese hängen auf gleiche Weise von den Polarisationsebenen beider Bündel, oder von der Richtung des Strahles ab. BREWSTER fand, dass diese Eigenschaften durch Wärme modificirt werden können, und durch solche Einflüsse sogar Krystallen mitgetheilt werden können, in welchen sie von Natur aus nicht vorhanden sind.

Ungeachtet der wichtigen Arbeiten BREWSTER's bleibt noch sehr viel für diesen Gegenstand zu thun. JOHN HERSCHEL hat vorgeschlagen, durch empirische Formeln die Intensität des hindurchgegangenen Lichtes, als von seiner Richtung abhängig darzustellen, und die Resultate der Formeln geben eine allgemeine Uebereinstimmung mit beobachteten Thatsachen [1]). Es ist sehr zu wünschen, dass diese Gesetze durch eine ganz besonders auf diesen Gegenstand gerichtete ausgedehnte Reihe von Versuchen ausser Zweifel gestellt würden. Obwohl die Gesetze der Absorption krystallisirter Medien nothwendig verwickelter sind, als die gewöhnlichen Mittel, so stehen sie doch in offenbarer und naher Relation mit den bekannten Gesetzen der doppelten

---

1) Vom Lichte p. 607 etc.

Brechung, welche uns einen Leitfaden zur Entdeckung derselben darzubieten scheinen, und ich bin überzeugt, dass die physikalische Theorie der Absorption aus den Phänomenen des Dichroismus hervorgehen, und in diesen ihre Bestätigung finden kann.

IV. Farben von Krystallplatten[1]).

Wenn ein durch Reflexion polarisirter Lichtstrahl auf einer zweiten reflektirenden Fläche unter dem Polarisationswinkel aufgefangen wird, so wird er völlig hindurchgelassen, wenn die zweite Einfallsebene senkrecht zur ersten steht. Aber wenn zwischen der polarisirenden und analysirenden Platte, wie man sie nennt, eine Platte von irgend einem doppeltbrechenden Krystall angebracht wird, so wird ein Theil des Lichtes reflektirt, dessen Grösse von der Stellung des dazwischen geführten Krystalles abhängt. Um die Erscheinung zu analysiren, kann die Krystallplatte so aufgestellt werden, dass der polarisirte Strahl senkrecht darauf fällt, worauf man sie in ihrer eigenen Ebene dreht. Man hat nun beobachtet, dass es zwei Stellungen der Platte giebt, bei welchen das reflektirte Licht völlig verschwindet, gerade als wenn der Krystall sich nicht dazwischen befände. Diese beiden Stellungen sind diejenigen, in welchen der Hauptschnitt und (kurz zu sagen) der senkrechte Schnitt des Krystalles mit der Ebene der ersten Reflexion zusammenfallen. Wenn die Platte aus jeder dieser Stellungen herumgedreht wird, so nimmt das Licht allmählig zu, und es erlangt sein Maximum, wenn der Hauptschnitt unter einem Winkel von 45° gegen die Ebene der ersten Reflexion geneigt ist. Diese Erscheinungen sind von Malus beobachtet.

---

1) Siehe den schönen Abschnitt VI. Farben-Erscheinungen durch Depolarisation des Lichtes in dünnen krystallisirten Körpern (Gehler's physik. Wörterbuch VII. 2te Abth. p. 754.) von Brandes. A. d. Ü.

Das reflektirte Licht war bei diesen Versuchen in allen Fällen weiss. Aber ARAGO bemerkte, dass wenn die dazwischen gestellte Platte hinreichend dünn sei, so wie die Blättchen, in welche Glimmer oder Gyps leicht zerspaltet werden kann, so erscheinen die prächtigsten Farben, welche sich mit jeder Aenderung der Neigung der Platte gegen den polarisirten Strahl ändern. Wenn die Platte senkrecht gegen das hindurchgegangene Bündel steht, und dann in ihrer Ebene gedreht wird, so ändert sich die Färbung nicht, sondern nur die Intensität, welche ein Maximum erreicht, wenn der Hauptschnitt des Krystalles unter einem Winkel von 45° gegen die Ebene der ersten Polarisation geneigt ist, und völlig verschwindet, wenn sie mit dieser Ebene zusammenfällt, oder senkrecht zu ihr steht. Wenn dagegen ein Krystall feststeht, und die analysirende Platte so gedreht wird, dass sich die Neigung der zweiten Reflexionsebene zu der ersten ändert, so ändern sich auch die Farben auf das Auffallendste; und man hat gefunden, dass die reflektirte Farbe, bei irgend einer Lage der Reflexionsebene, stets der in senkrechter Stellung reflektirten complementär ist. Die Farben verschwinden gänzlich, wenn die Dicke der Krystallplatte bis unter eine gewisse Grenze reducirt ist[1]).

Die experimentellen Gesetze dieser Phänomene wurden mit unermüdlichem Eifer von BIOT erforscht[2]). Wenn das Licht senkrecht auf Platten von derselben Substanz, aber von verschiedener Dicke, auffiel, so bemerkte man, dass die Färbungen dasselbe Gesetz befolgten, als die Farben dünner Blättchen; die Dicke des Krystalles, bei welcher eine jede Farbe auf's Vollkommenste zum Vorschein kam, war dabei der Dicke der Luftschicht proportional, welche nach der NEWTON'schen Skale dieselbe Farbe giebt. Diese Dicke ändert sich mit der Natur des Krystalles, und ist stets weit grösser, als die correspondirende Dicke der unkrystallisirten

1) *Mém. Inst.* 1811.
2) *Mém. Inst.* 1812.

Platte, welche dieselbe Färbung zeigt. Bei weiterer Verfolgung derselben Untersuchung fand BIOT später für schiefe Incidenzen, dass bei einaxigen Krystallen die zum Vorschein gekommene Farbe durch die Länge des vom Lichte innerhalb des Krystalles durchlaufenen Weges, so wie durch das Sinusquadrat des Winkels, welchen seine Richtung mit der optischen Axe macht, bestimmt wird. Aus diesem Gesetze folgte, dass wenn eine Krystallplatte von mittlerer Dicke senkrecht gegen die Axe zerschnitten wird, und ein convergirendes oder divergirendes Bündel durch sie hindurchgeht, die Linien gleicher Färbung, oder die isochromatischen Linien, wie sie zuweilen genannt werden, in concentrischen Kreisen, ähnlich den NEWTON'schen Ringen, liegen werden. Diese Erscheinung wurde unter verschiedenen Umständen von DAVID BREWSTER, von WOLLASTON, BIOT und SEEBECK beobachtet.

Auf BIOT's Untersuchungen folgten BREWSTER's. Bei Erforschung des Gesetzes der Färbungen in zweiaxigen Krystallen betrachtet BREWSTER die optischen Axen als die Resultanten anderer, welche er polarisirende Axen nennt. Die durch eine einzelne Axe entstehende Färbung wird als Maass ihrer polarisirenden Kraft genommen, und man nimmt an, sie ändere sich wie das Sinusquadrat des von ihr und der Axe eingeschlossenen Winkels, und wenn zwei solcher Axen zusammenwirken, so wird die aus ihrer vereinigten Wirkung hervorgehende Farbe durch die Diagonale eines Parallelogrammes gemessen, dessen Seiten die durch jede Axe einzeln hervorgebrachte Farbe darstellen, und dessen Winkel der doppelte von dem ist, welcher von beiden Ebenen, die durch sie und den Strahl gehen, gebildet wird. Dies Gesetz hat DAVID BREWSTER durch Vergleichung mit BIOT's Beobachtungen über den Gyps bestätigt, und die Uebereinstimmung mit den Phänomenen war vollkommen [1]).

---

1) *„On the Laws of Polarization and double Refraction in regularly crystallized Bodies."* *Phil. Trans.* 1818.

Als es von Biot analytisch entwickelt wurde, fand er, dass es mit dem schönen Gesetze übereinstimme, zu welchem er selbst durch die Analogie geleitet ward, nämlich dass die Farbe durch das Produkt aus den Sinus der Winkel gemessen wird, welche die Richtung des Strahles im Innern des Krystalles mit den optischen Axen macht [1]). Aus diesem Gesetze folgte leicht, dass die isochromatischen Linien in zweiaxigen Krystallen Lemniscaten sein werden, deren Pole in der scheinbaren Richtung der optischen Axen liegen [2]). Diese Erscheinung wurde zuerst von Brewster beim Topas wahrgenommen. Das Gesetz ist von John Herschel auf das Vollkommenste nachgewiesen, welcher fand, dass der constante Parameter, oder das Produkt der Radii vectores, welche von irgend einem Punkte nach beiden Polen gezogen werden, sich umgekehrt wie die Dicke der Platte verhält, bei verschiedenen Platten ein und derselben Substanz, und in ein und derselben Platte, von einer Curve zu einer andern, wie die Zahlen der natürlichen Zahlenreihe wächst.

---

1) Aus Biot's Untersuchungen ergab sich, dass das Maass der Färbung bei einaxigen Krystallen dasselbe Gesetz befolge, welches man in der Emissionstheorie für die Differenz der Quadrate der Geschwindigkeiten beider Strahlen angiebt. Dieselbe Relation nahm man als allgemein gültig an, und so folgerte man aus dem Gesetze der Färbungen in zweiaxigen Krystallen das Verhältniss der Geschwindigkeiten beider Bündel, welches wir im vorigen Abschnitte angeführt haben.

2) Biot hatte im Tyroler Diopsid eine scheinbare Ausnahme von diesem Gesetz beobachtet, in welchem die Ringe im Allgemeinen unsymmetrisch gegen die beiden Axen stehen. Eine der Axen zeigt die gewöhnlichen Erscheinungen, aber in der Nähe der anderen findet sich eine merkwürdige Verzerrung der Ringe dicht bei ihrem Mittelpunkte, wenn die Krystallplatte in ihrer Ebene gedreht wird. Diese Verzerrungen scheinen ein regelmässiges Gesetz zu beobachten, und waren bei jedem angestellten Versuche dieselben. Es kann bemerkt werden, dass die optischen Axen dieses Krystalles unsymmetrisch gegen die Krystallform liegen. *Mém. Inst. tom. X.*

Um diese verschiedenen Erscheinungen nach der Emissionstheorie zu erklären, ersann BIOT seine scharfsinnige und schöne Theorie der beweglichen Polarisation. Wenn ein polarisirter Strahl von irgend einer Farbe in eine Krystallplatte eintritt, so nimmt diese Theorie an, die componenten Molekeln drängen zuerst bis auf eine gewisse Tiefe ein, ohne ihre erste Polarisation zu verlieren; dann fingen sie eine Reihe regelmässiger Oscillationen um ihre Schwerpunkte an, wobei die Polarisationsaxen abwechselnd nach der einen oder der andern Seite der Axe des Krystalles, oder der gegen diese Senkrechten gerichtet werden. Da diese Oscillationen isochronisch sind, so ist die Dicke, welche das Molekel bei seiner Bewegung des Umschwungs während jeder derselben durchläuft, constant, und man nimmt an, sie sei gleich der doppelten Tiefe, bis zu welcher es vor Beginn seiner Vibrationen eingedrungen war. Die oscillatorische Bewegung hört der Annahme zufolge auf, wenn die Molekeln aus der zweiten Fläche des Krystalles wieder in die Luft treten; der heraustretende Strahl hat eine feste Polarisation, und zwar dieselbe, als wenn die letzte Oscillation der Molekeln wirklich im Augenblicke des Austretens vollendet wäre. Also ist ein polarisirter Strahl, welcher ein dünnes Krystallblättchen durchlaufen hat, zuletzt entweder in der primitiven Ebene, oder in einer gegen diese unter einem Winkel, der gleich dem doppelten von dem ist, welchen sie mit dem Hauptschnitt macht, geneigten Ebene polarisirt, je nachdem die Dicke des Krystalles ein ungrades oder ein grades Multiplum einer gewissen Länge ist[1]). Die aus diesen Postulaten hergeleitete Formel repräsentirt alle einleuchtenderen Gesetze der Färbungen mit grosser Genauigkeit.

Diese angenommene Differenz zwischen den durch dicke und dünne Krystalle hervorgebrachten Wirkungen, wurde

---

1) *„Sur un nouveau genre d'oscillations etc.“* *Mém. Inst.* 1812.

indess durch FRESNEL's entscheidende Versuche widerlegt. Wenn zwei ein wenig geneigte Spiegel so gestellt werden, dass sie das einfallende Licht unter dem Polarisationswinkel auffangen, und zwei Gypsblättchen von gleicher Dicke dazwischengestellt werden, in der Bahn jedes der reflektirten Bündel eins, und zwar so, dass ihre Hauptschnitte unter einem Winkel von 45° auf jeder Seite der Ebene der primitiven Polarisation geneigt sind, so beweisen die Interferenzerscheinungen auf das Klarste, dass das von jedem ausgehende Licht aus zwei respektive im Hauptschnitt und dem senkrechten Schnitte polarisirten Bündeln besteht, und dass die Resultate von den mit dicken Krystallschnitten erhaltenen nur darin abweichen, dass beide Bündel übereinander liegen [1]). Das aus der Vereinigung dieser entgegengesetzt polarisirten Bündel hervorgehende Licht hat in gewissen Fällen die ihm in der BIOT'schen Theorie beigelegten Eigenschaften; aber diese Eigenschaften sind unmittelbare und nothwendige Folgerungen aus den Interferenzgesetzen des polarisirten Lichtes, und aus der Theorie der Querschwingungen.

Wir wollen nun sehen, welche Erklärung die Wellentheorie von denselben Erscheinungen giebt. — Wenn ein Lichtstrahl in eine Krystallplatte eintritt, so wird er in zwei Strahlen zertheilt, oder in der Sprache der Wellentheorie, eine Reihe von Wellen, welche auf den Krystall treffen, wird innerhalb desselben in zwei zerlegt, welche

---

1) Siehe den von der Akademie der Wissenschaften 1821 gegebenen Bericht über FRESNEL's Abhandlung von den Farben krystallisirter Platten, *Annales de Chimie, tom. XVII.* (POGGEND. Ann. XXII.) Ein einleuchtender Einwurf gegen die BIOT'sche Theorie lässt sich von einem Faktum hernehmen, welches er selbst beobachtete, nämlich dass die Farbenphänomene dadurch hervorgebracht werden können, dass man zwei dicke Platten von fast gleicher Dicke kreuzweis übereinander legt, obwohl die Dicke einer jeden hinreichend war, zwei deutlich gesonderte Bilder zu erzeugen, und wir daher eine feste Polarisation haben.

ihn nach verschiedenen Richtungen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen. Eine dieser Wellenreihen wird daher hinter der andern zurückbleiben, und beim Austritte werden sie sich in verschiedenen Vibrationsphasen befinden. Wenn die Platte dünn ist, so liegen die heraustretenden Wellen übereinander, und da die Verzögerung dann nur wenige Undulationen und Theile einer Undulation betragen wird, so würde folgen, dass wir hier alle Bedingungen haben, welche zu ihrer Interferenz und der daraus folgenden Entstehung der Farbe nothwendig sind. Das war YOUNG's scharfsinnige Conjektur. Und wirklich beobachtete YOUNG kurz nach der Bekanntmachung von BIOT's ersten Untersuchungen über die Gesetze der Färbungen für verschiedene Dicken, dass diese Färbungen genau dem Intervall beider Bündel entsprechen, so dass sie ganz offenbar durch Interferenz entstanden [1]). Dieses Entsprechen ist jetzt auf das Vollständigste entschieden. Es ist eine nahe liegende Folgerung aus FRESNEL's Theorie der doppelten Brechung, dass das Intervall der Verzögerung beider Bündel beim Durchlaufen einer Krystallplatte fast genau proportional ist der Länge ihres Weges im Innern des Krystalles, multiplicirt in das Produkt der Sinus derjenigen Winkel, welche ihre Richtung mit beiden optischen Axen macht, und da sich fand, dass dies das allgemeine Maass für die Farbe sei, so folgt, dass die Gestalten der isochromatischen Curven, die Lemniscaten und die Kreise, alle nothwendige Folgerungen aus der Wellentheorie sind.

Aber bei der ersten Anwendung des Interferenzprincipes auf die Farben krystallisirter Platten zeigt sich eine Schwierigkeit, für welche die bekannten Gesetze nicht hinreichen. Nach dieser Erklärung sollten die Interferenz- und Farbenerscheinungen durch den Krystall allein und in gewöhnlichem Lichte, ohne irgend eine polarisirende oder analysirende Platte hervorgebracht werden. Das ist indess

---

1) *Quaterly Review*, *vol. XI.*

nicht wirklich der Fall, und die Schwierigkeit schien darin zu liegen, nicht zu erklären, wie die Erscheinungen hervorgebracht werden, sondern zu zeigen, warum sie nicht immer hervorgebracht werden. ARAGO und FRESNEL stellten die Frage auf, in wie weit der Zustand der Polarisation beider Bündel die bekannten Interferenzgesetze wohl modificiren könnte; und die Resultate, welche die Untersuchung ergab, haben glücklicherweise eine Hebung der Schwierigkeit möglich, und die Lösung des Problems vollständig gemacht. Man fand, dass die in ein und derselben Ebene polarisirten Lichtstrahlen mit einander unter denselben Umständen interferiren und Fransen hervorbringen, als Strahlen gewöhnlichen Lichtes; dass, wenn die Polarisationsebenen gegen einander geneigt sind, die Interferenz verringert wird, und die Ringe an Intensität abnehmen; und dass endlich, wenn der Winkel zwischen diesen Ebenen ein Rechter ist, die Strahlen gar nicht mehr interferiren. Daher können die beiden Strahlen, welche aus einer Krystallplatte heraustreten, nicht interferiren, da sie entgegengesetzt polarisirt sind, und um die Farbenerscheinungen vollkommen entstehen zu lassen, müssen ihre Polarisationsebenen vom Experimentator zur Coincidenz gebracht werden.

Das Nicht-Interferiren entgegengesetzt polarisirter Strahlen ist ein nothwendiges Ergebniss aus der mechanischen Theorie der Querschwingungen. FRESNEL hat nach den Principien dieser Theorie gezeigt, dass die Intensität des aus der Vereinigung zweier solcher Strahlen hervorgehenden Lichtes constant, und gleich der Summe der Intensitäten der Componenten ist, in welchen Vibrationsphasen sie auch einander treffen mögen. Aber obwohl die Intensität des Lichtes sich nicht mit der Phase der componenten Vibrationen ändert, so wird das doch mit der Beschaffenheit der resultirenden Vibration der Fall sein. Aus der Theorie geht hervor, dass zwei geradlinige und rechtwinklige Vibrationen eine einzige Vibration zusammensetzen, welche ebenfalls geradlinig sein wird, wenn die Phasen

der componenten Vibrationen um eine ganz bestimmte Menge halber Undulationen verschieden sind; dass in anderen Fällen die resultirende Vibration elliptisch sein werde; und dass die Ellipse ein Kreis werden wird, wenn die componenten Vibrationen gleiche Amplituden haben, und die Differenz ihrer Phasen ein ungerades Multiplum einer Viertelwellenlänge ist. Diese Resultate der Theorie sind durch Experimente vollständig bestätigt worden. Wenn ein polarisirter Strahl, welcher von einer leuchtenden Quelle ausgeht, durch zwei Doppelspath-Rhomboeder von gleicher Dicke geht, deren Hauptschnitt um 45° auf jeder Seite der ersten Polarisationsebene geneigt sind, so wird das austretende Licht weiter gehen, als käme es von zwei nahen Punkten, und beide Theile werden entgegengesetzt polarisirt sein. Fresnel und Arago fanden, dass das aus der Vereinigung dieser Bündel hervorgehende Licht linear, circular oder elliptisch polarisirt war, je nach der Differenz der Wege, welche sie durchlaufen hatten, wenn sie zusammentrafen.

Hiermit hätten wir eine Erklärung der Thatsachen, welche die Theorie der beweglichen Polarisation veranlasst zu haben scheinen, und wir lernen vielmehr, dass sie nur besondere Fälle des allgemeinen Resultates sind. Das aus der Vereinigung des gewöhnlichen und ungewöhnlichen Bündels, welche aus der Krystallplatte heraustreten, hervorgehende Licht, wird in der ersten Ebene, oder in einer gegen diese unter einem Winkel, der gleich dem doppelten von dem ist, welchen sie mit dem Hauptschnitt macht, geneigten Ebene polarisirt sein, je nachdem das Intervall der Verzögerung beider Bündel ein gerades oder ungerades Multiplum einer halben Wellenlänge ist. In anderen Fällen, wenn die Dicke des Krystalles irgend einen anderen Werth hat, als der ist, welcher genau diesen Intervallen entspricht, wird das hervorgehende Licht elliptisch polarisirt sein. Die Ellipse wird ein Kreis werden, und das Licht vollkommen depolarisirt scheinen, wenn beide Bündel von glei-

cher Intensität sind, und das Intervall der Verzögerung ein ungerades Multiplum einer Viertelwellenlänge ist. Hier bietet sich nun eine leichte Methode, die Theorie der beweglichen Polarisation auf die Probe zu stellen. Wenn eine Gypsplatte, deren Dicke einem solchen Intervall entspricht, in einen Strahl polarisirten Lichtes von irgend einer Farbe gehalten wird, so dass ihr Hauptschnitt unter einem Winkel von 45° gegen die Ebene der ersten Polarisation geneigt ist, so muss das heraustretende Licht, nach der Wellentheorie, circular polarisirt sein, und beide Bündel, in welche es durch den analysirenden Doppelspath zerlegt wird, dürfen sich während seiner Drehung nicht an Intensität ändern. Nach der Theorie der beweglichen Polarisation dagegen sollte das Licht linear polarisirt sein, und eins der Bilder sollte verschwinden, wenn der Hauptschnitt des Doppelspathes entweder mit der primitiven Ebene, oder mit der gegen sie senkrechten Ebene zusammenfällt. Dieses *experimentum crucis* wurde von Fresnel und Arago angestellt, und das Resultat war genau das, welches die Wellentheorie vorausgesagt hatte [1]).

Bei weiterer Verfolgung ihrer Untersuchungen über die Interferenzgesetze des polarisirten Lichtes entdeckten Fresnel und Arago ferner, dass zwei entgegengesetzt polarisirte Strahlen nicht mit einander interferiren werden, selbst wenn man ihre Polarisationsebenen zusammenfallen lässt, wenn sie nicht zu demselben Bündel gehören, der ursprünglich in Einer Ebene polarisirt war; und dass bei der Interferenz der Strahlen, welche eine doppelte Brechung erlitten haben, eine halbe Undulation als verloren oder gewonnen angenommen werden muss, wenn sie aus dem gewöhnlichen in das ungewöhnliche System übergehen. Das letztere Princip ist eine schöne und einfache Folgerung aus der Theorie der Querschwingungen. Wenn eine Vibration nach irgend einer

1) *Annales de Chimie, tom. XVII.*

einer gegebenen Richtung in zwei unter einander rechtwinklige zerlegt wird, und jede dieser wieder in ein zweites Paar, nach zwei fixen Richtungen, welche ebenfalls senkrecht zu einander stehen, so wird sich leicht ergeben, dass von den vier Componenten, in welche die ursprüngliche Vibration also zerlegt ist, die beiden in einer der letzten Richtungen zusammenwirken, während die in der andern Richtung entgegengesetzt wirken. Die durch Interferenz der ersteren hervorgebrachte Färbung entspricht daher dem wirklichen Unterschiede zwischen den Wegen beider polarisirten Strahlen innerhalb der Platte, während die aus den letzteren entstehende zu demselben Unterschied gehört, um eine halbe Undulation vergrössert oder vermindert.

Das erstere der beiden angeführten Gesetze erklärt die Wirkung der polarisirenden Platte bei diesen Erscheinungen. Um das Faktum der Nicht-Interferenz beider Bündel, wenn das auf den Krystall auffallende Licht unpolarisirt ist, zu erklären, ist es nöthig, solches Licht als eine schnelle Folge von Wellensystemen, die in allen Azimuthen polarisirt sind, zu betrachten; so dass, wenn irgend zwei rechtwinklig zu einander stehende Ebenen angenommen werden, eine gleiche Menge von Licht in jeder polarisirt ist. Ein jeder dieser Theile wird, wenn er innerhalb des Krystalles in zwei zerlegt wird, und diese nachher durch die analysirende Platte auf ein und dieselbe Polarisationsebene reducirt werden, die Interferenzerscheinungen zeigen. Aber das Intervall der Verzögerung differirt in beiden Fällen um eine halbe Wellenlänge, die hervorgebrachten Farben werden daher complementär sein, und das aus ihrer Vereinigung hervorgehende Licht wird eine gleichförmige Weisse haben.

Wir sind also zu der Annahme genöthigt, dass gewöhnliches Licht aus einer schnellen Folge von Wellensystemen besteht, in deren jedem die Vibrationen verschieden sind. Aber die Interferenzerscheinungen (welche ge-

wöhnliches Licht zeigt, berechtigen uns auch, wie Airy bemerkt hat[1]), anzunehmen, dass die Vibrationen sich nicht durchgängig ändern, und dass es in jedem Wellensysteme wahrscheinlich einige hundert auf einander folgender Vibrationen giebt, welche alle einander ähnlich sind, — obwohl die Schwingungen eines Systemes in keiner Beziehung zu denen eines andern stehen, und die verschiedenen Systeme mit solcher Schnelligkeit auf einander folgen, dass jede Spur von Polarisation verschwindet. Dieser Uebergang *per saltum* von einem Wellensysteme zu einem andern, in welchem die Vibrationen völlig verschieden sind, scheint eine Verwirrung hinsichtlich der Beschaffenheit des Lichtes zu sein, vor welcher uns die schöne Einfachheit der besser bekannten Theile nicht bewahrt hat, und ich kann die Hoffnung nicht aufgeben, dass die Hypothese, welche jetzt als Repräsentantin der experimentellen Gesetze dasteht, einem einfacheren physikalischen Principe weichen werde.

Die Interferenzgesetze des polarisirten Lichtes haben somit das mangelnde Glied in der zuerst von Young angegebenen Erklärung der Farben krystallisirter Platten ergänzt. Die Grössen der zerlegten Vibrationen sind bekannt, wenn die Polarisationsebenen beider Bündel in Rücksicht auf die Ebene der primitiven Polarisation und die Ebene der Zerlegung gegeben ist; und da wir mit Hülfe der Gesetze der doppelten Brechung im Stande sind, das Intervall der Verzögerung beider Bündel zu finden, so haben wir alle Angaben, welche zur Berechnung der Intensität und der Farbe des aus ihrer Interferenz hervorgehenden Lichtes nöthig sind. Diese Berechnung hat Fresnel nicht nur für eine einzige Platte, sondern ebenfalls für zwei auf einanderliegende Platten gegeben[2]), und die Theorie ist seitdem von Airy noch vollständiger entwickelt worden[3]). Die

---

1) *Mathematical tracts, p.* 407.

2) *Annales de Chimie, tom. XVII.* (Poggend. Ann. XXII.)

3) *Cambridge Transactions* 1831 (Poggend. Ann. XXVI. p. 123) und *Math. Tracts.*

Resultate fanden sich in jedem Falle genau mit den beobachteten Thatsachen übereinstimmend, und alle Umstände bei farbigen Ringen in ein- und zweiaxigen Krystallen sind vollständig erklärt.

Die Gestalt der Ringe, oder die isochromatischen Curven hangen nur vom Intervall der Verzögerung ab, und die Grösse dieses Intervalles ist nur annähernd gefunden. M'Cullagh hat unlängst eine allgemeine und genaue Methode zur Berechnung desselben, und zur Bestimmung der Gestalten der Ringe für irgend eine Platte eines doppeltbrechenden und von parallelen Flächen begränzten Krystalles gegeben. Diese Methode ist von den Eigenschaften der Fläche der Wellenträgheit abhängig gemacht, von der ich schon anderweitig gesprochen habe, und man hat gefunden, dass wenn man den einfallenden Strahl die Kugel treffen lässt (welche die Fläche der Wellenträgheit für Luft ist), und durch den Schneidungspunkt eine Senkrechte auf die brechende Fläche gezogen wird, welche beide Coordinat-Ebenen der Oberfläche der Wellenträgheit für den Krystall trifft, so werden die Intervalle der Verzögerung der Strahlen beim Austritte durch die Dicke des Krystalles gemessen, multiplicirt in die Differenz der dazu gehörigen Ordinaten [1]). Mit Hülfe eines Ausdruckes für den Weg des Strahles, hat der Autor seine Schlüsse auch für einen Strahl ausgedeht, welcher eine beliebige Menge innerer Reflexionen erlitten hat.

Wenn das doppeltbrechende Vermögen des Krystalles

1) Wenn y_i y_o y_e die zugehörigen Coordinaten der Kugel und der beiden Coordinat-Ebenen der Oberfläche der Wellenträgheit für das Medium sind, und Θ die Dicke des Krystalles bezeichnet, so werden $\Theta(y_o - y_i)$, $\Theta\, y_e - y_i)$ die Verzögerungen beider gebrochenen Wellen beim Austritte sein, und $\Theta(y_o - y_e)$ ist das Intervall zwischen ihnen. — „*Geometrical Propositions applied to the Wave-theory of Light.*“ *Trans. R. J. Academy, vol. XVII.*

für Licht von jeder Farbe ein und dasselbe wäre, so müssten die Farben der Ringe genau der NEWTON'schen Farbenskale folgen, und ihre Grössen müssten dieselben Gesetze beobachten, wie die Ringe, welche zwischen zwei Objectivgläsern gebildet werden. Dies ist der Fall beim Kalkspath, beim Beryll und einigen anderen Krystallen, und in diesen sind daher die Farben denen dünner Blättchen ähnlich. Aber JOHN HERSCHEL und DAVID BREWSTER haben viele merkwürdige Abweichungen von diesem Gesetze beobachtet. So bemerkte ersterer im gewöhnlichen einaxigen Apophyllite, dass die Durchmesser der Ringe für alle Farben des Spektrums sehr nahe dieselben waren, so dass die Ringe von verschiedenen Farben übereinander lagen, und eine Reihefolge von abwechselnd Schwarz und Weiss bildeten, welche durch eine grosse Anzahl von Ordnungen verfolgt werden können[1]). In diesem merkwürdigen Falle nun ändert sich die Kraft des Krystalles sehr nahe im halben Verhältniss der Längen der Wellen für Strahlen von verschiedener Farbe. Ein sehr merkwürdiger Fall der Umkehrung der NEWTON'schen Farbenskale wurde von JOHN HERSCHEL bei einigen seltenen Abänderungen desselben Minerals beobachtet. Die Durchmesser der Ringe werden, statt sich mit zunehmender Brechbarkeit zusammenzuziehen, grösser, und unendlich für Strahlen von mittlerer Brechbarkeit. Nachdem sie unendlich geworden sind, erhalten sie wieder einen endlichen Werth, und nehmen ab, wie die Brechbarkeit bis zum äussersten Ende des Spektrums zunimmt. Dann ist der Krystall für Strahlen einer gewissen mittleren Brechbarkeit einfach brechend, und da die doppelte Brechung ihren Charakter ändert, wenn sie durch Null geht, so ist der Krystall positiv für die Strahlen des einen Endes des Spektrums, und negativ für die des anderen Endes[2]). Diese sonderbare Erscheinung wird nach

1) *Phil. Trans.* 1820.
2) *Cambridge Trans.* 1821. Aehnliche Eigenschaften wur-

den Principien der FRESNEL'schen Theorie durch die Annahme erklärt, dass die Elasticität mit der Länge der Welle zunimmt, und zwar schneller in der Axenrichtung des Krystalles, als in der zu dieser senkrechten, so dass der Unterschied dieser Elasticitäten positiv für die Strahlen eines Endes des Spektrums ist, negativ für die des andern, und dass sie bei einem dazwischenliegenden Punkte verschwinden.

In zweiaxigen Krystallen finden ähnliche Abweichungen in der Grösse der Lemniscaten je nach den verschiedenen einfachen Farben statt. Aber hier findet sich eine andere Quelle für eine Unregelmässigkeit, welche bei einaxigen Krystallen nicht vorhanden ist. Die optischen Axen ändern sich im Allgemeinen mit den Farben, so dass die Lemniscaten auch in der Lage ihrer Pole verschieden sind, und die Farben verschiedener Theile ein und desselben Ringes nicht dieselben sind. Wo die optischen Axen, welche zu verschiedenen Farben gehören, in verschiedenen Ebenen liegen, wie JOHN HERSCHEL beim Borax einen solchen Fall beobachtete, da ist die in den farbigen Curven hervorgebrachte Unregelmässigkeit noch auffallender.

In allen vorhergehenden Fällen sind die Gesetze der doppelten Brechung nur von der Richtung abhängig, und sie sind durch die ganze Masse dieselben. Bei manchen Krystallen, z. B. beim Analcim und einigen Varietäten des Apophyllites ist es jedoch anders. Die complicirte Anordnung der farbigen Bänder, welche diese Substanzen in polarisirtem Lichte entfalten, beweist, dass sie aus mehreren gesonderten Theilen bestehen, welche verschiedene optische Eigenschaften besitzen; und die Erscheinungen deuten auf Relationen unter den Molekulärkräften, und auf Aggregationsprincipien, von denen es in einigen Fällen schwer ist,

---

den von HERSCHEL auch an anderen Krystallen beobachtet, wie beim unterschwefelsauren Kalk und beim Vesuvian. Aus der Farbentafel, welche letztere Substanz zeigt, ergiebt sich, dass das am meisten gebrochene beider Bilder das am wenigsten zerstreute ist.

sich nur eine Vorstellung zu machen. Diese merkwürdigen Erscheinungen und deren Gesetze wurden von David Brewster entdeckt[1]).

Wenn ein polarisirter Strahl eine Platte von Doppelspath, von Beryll, oder fast jedes anderen einaxigen Krystalles in der Richtung der Axe durchläuft, so erleidet er durchaus keine Aenderung, so dass, wenn der austretende Strahl durch ein doppeltbrechendes Prisma analysirt wird, beide Bündel, in welche er zertheilt wird, farblos sind, und einer von ihnen verschwindet, wenn der Hauptschnitt des Prisma's parallel oder senkrecht gegen die Ebene der ersten Polarisation steht. Aber wenn ein Strahl auf dieselbe Weise durch eine Platte von Bergkrystall geht, so sind die Erscheinungen sehr verschieden. Bei jeder Stellung des Prisma's entstehen zwei Bilder; diese haben complementäre Farben, und die Farben ändern sich auf's Prächtigste, wenn das Prisma herumgedreht wird. Diese Erscheinungen zeigen an, dass die Polarisationsebene geändert worden ist, und zwar verschieden für die verschiedenen Strahlen des Spektrums. Sie wurden zuerst von Arago beobachtet, welcher einen Bericht über seine Beobachtungen in seinem Memoire über die Farben krystallisirter Platten gegeben hat (gelesen im Institut, 1811).

Dieser Gegenstand wurde dann von Biot aufgenommen, in einer Abhandlung in den *Mémoires de l'Institut*, im Jahre 1812, und die Analyse des Phänomens wurde in einem zweiten Memoire, gelesen 1818, vervollständigt[2]). Wenn ein polarisirter Strahl von irgend einer einfachen Farbe durch eine Platte von Bergkrystall in der Richtung der optischen Axe geht, so ist er nach dem Austritte noch polarisirt; aber seine Polarisationsebene hat sich geändert. Der Winkel, um welchen die Ebene sich gedreht hat, än-

---

1) *Edinb. Trans. vol. IX* u. *X*.

2) „*Mémoire sur les rotations que certaines substances impriment aux axes de polarisation des rayons lumineux.*“

dert sich mit der Farbe des Lichtes und mit der Dicke der Platte, ist aber proportional dieser Dicke, dividirt durch das Quadrat der Länge der Anwandlung oder der Welle. Bei einigen Krystallen dreht sich die Polarisationsebene von links nach rechts, während sie sich in andern nach der entgegengesetzten Richtung wendet, und die Krystalle selbst heissen rechts oder links drehende, je nachdem sie die eine oder die andere dieser Wirkungen hervorbringen. Wenn zwei Platten übereinander gelegt werden, so wird sehr nahe dieselbe Wirkung hervorgebracht, welche eine einzige Platte haben würde, deren Dicke die Summe oder die Differenz der Dicken beider Platten wäre, je nachdem sie zu derselben oder zu entgegengesetzten Klassen gehören.

Diese wunderbare Verschiedenheit zwischen Platten, welche aus verschiedenen Krystallen geschnitten waren, ist von John Herschel mit einer entsprechenden Verschiedenheit in der Krystallform in Zusammenhang gebracht worden. Die gewöhnliche Gestalt der Quarzkrystalle ist das sechsseitige Prisma mit der sechsflächigen Zuspitzung. Die Kantenwinkel, welche die Flächen der Pyramide mit denen des Prisma's machen, sind zuweilen durch kleine sekundäre Flächen ersetzt, welche alle in demselben Krystalle nach derselben Richtung geneigt sind. Man fand nun, dass wenn diese Richtung rechts ist (die Spitze der Pyramide nach oben gerichtet), der Krystall auch ein rechts drehender ist; dass er dagegen ein linksdrehender ist, wenn die Flächen im entgegengesetzten Sinne geneigt sind[1]). David Brewster hat gezeigt, dass der Amethyst, oder der violette Quarz, aus auswechselnden Schichten von rechts- und von linksdrehendem Quarz zusammengesetzt ist. Durch das verschiedene Hervorragen dieser Schichten erhält der Bruch dieses Minerals das eigenthümliche wellenförmige An-

1) *Cambridge Trans. vol. I.*

sehen. Die Struktur selbst wird im polarisirten Lichte auf das Schönste deutlich [1]).

Einige Flüssigkeiten und selbst Gase besitzen nach Biot und Seebeck dieselbe Eigenschaft wie der Quarz, obwohl in weit schwächerem Grade, und bewirken eine Rotation der Polarisationsebene des hindurchfallenden Strahles, welche der Dicke der durchlaufenen Substanz proportional ist. Diese Flüssigkeiten verlieren ihr Drehungsvermögen nicht durch Zusammenmischen mit andern Flüssigkeiten. Sie behalten es sogar, wenn sie in Dampf verwandelt werden; und im Allgemeinen ist das Drehungsvermögen vom Aggregatzustande unabhängig, vorausgesetzt, dass die molekulare Beschaffenheit ungeändert bleibt. Endlich ist, wenn zwei oder mehrere dieser Flüssigkeiten zusammengemischt werden, welche diese Eigenschaft besitzen, die von der Mischung hervorgebrachte Rotation die Summe der durch die einzelnen Flüssigkeiten hervorgebrachten, bei, den Voluminibus, in welchen sie gemischt sind, proportionalen Dicken. Aus diesen und anderen Thatsachen schliesst Biot, dass die Eigenschaft der rotatorischen Polarisation den letzten Theilchen des Körpers inhärirt, und nicht von ihrem Abstande von einander, oder von ihrer Anordnung abhängig sei [2]). Dagegen findet man, dass der Quarz diese Eigenschaft verliert, wenn man ihn seiner krystallinischen Struktur beraubt. So beobachtete John Herschel, dass in Kali gelöster Quarz die Eigenschaft nicht besass, und dasselbe bemerkte Brewster beim geschmolzenen Quarz.

1) *Edinb. Trans. vol. IX.*

2) Biot hat neuerlich seine Untersuchungen über diesen Gegenstand auf eine grosse Menge von Substanzen ausgedehnt. *Annales du museum d'histoire naturelle, tom. II.* In einer vor der franz. Akademie im letzten Jahre gelesenen Abhandlung hat er die Gesetze der Circular-Polarisation auf die Analyse des Vegetationsprocesses in den Gewächsen angewendet, und er hat im Allgemeinen die Wichtigkeit der aus diesen Phänomenen für die Untersuchungen der organischen Chemie hergeleiteten Anzeichen angedeutet. *Institut, Nos.* 1. u. 9.

Die Erscheinungen der drehenden Polarisation beim Bergkrystall schrieb Biot einer fortwährenden Rotation der Lichtmolekeln um ihre Schwerpunkte zu, hervorgebracht durch die Wirkung unbekannter Kräfte. Fresnel hat bewiesen, dass sie von der Interferenz zweier circular polarisirter Bündel herrühren, welche sich längs der Axe mit ungleichen Geschwindigkeiten fortbewegen, während sich der eine von links nach rechts, und der andere in entgegengesetzter Richtung dreht. Ein linearpolarisirter Strahl ist in der That zweien cirkularpolarisirten von halber Intensität gleichwerthig, wenn in einem derselben die Schwingungen von links nach rechts, und im andern in entgegengesetzter Richtung geschehen. Wenn daher ein linearpolarisirter Strahl senkrecht auf eine Bergkrystallplatte fällt, die senkrecht gegen die Axe geschnitten ist, so kann er in zwei solche circularpolarisirte Strahlen zerlegt werden. Man nimmt an, diese gingen mit verschiedenen Geschwindigkeiten hindurch, so dass, wenn sie beim Austritte eine gewöhnliche Geschwindigkeit annehmen, der eine derselben dem andern zuvor ist. Sie bilden dann einen einzigen, in einer einzigen Ebene polarisirten Strahl, und es lässt sich zeigen, dass diese Ebene von der Ebene der primitiven Polarisation um einen Winkel entfernt ist, welcher dem Intervall der Verzögerung beider Bündel proportional ist, und daher durch die Dicke des Krystalles gemessen wird. Aber dieses Intervall ändert sich ebenfalls mit der Farbe des Lichtes, und wir sind genöthigt anzunehmen, dass es für eine gegebene Menge von Wellen dasselbe ist, wie lang diese auch sein mögen, so dass für eine gegebene Dicke des Krystalles es sich umgekehrt wie die Wellenlänge verhält. Aus dieser Annahme wird folgen, dass die Abweichung der Polarisationsebene des heraustretenden Strahles sich umgekehrt wie das Quadrat jener Länge verhält, ganz mit Biot's experimentellen Resultaten übereinstimmend [1]).

---

1) *Annales de Chimie, tom. XXVIII. p.* 147. (Poggend. Ann. XXI. p. 276.)

Die Gesetze der drehenden Polarisation sind jetzt vollständig erklärt, und es bleibt nur übrig, die Richtigkeit der Hypothese zu beweisen, dass zwei circularpolarisirte Bündel, deren Vibrationen entgegengesetzte Richtungen haben, längs der Axe des Quarzes mit verschiedenen Geschwindigkeiten hindurchgehen werden. Diese Annahme ist leicht durch einen Versuch zu prüfen, denn eine solche Differenz der Geschwindigkeiten muss Veranlassung zu einer Differenz der Brechung geben, wenn die Fläche, aus welcher der Strahl austritt, schief gegen die Richtung des Strahles liegt. Nach der Hypothese sollte daher ein linearpolarisirter Strahl, wenn er in der Richtung der optischen Axe durch ein Prisma von Bergkrystall gegangen ist, beim Austritte eine doppelte Brechung erleiden, und beide Bündel, in welche er zerlegt wird, sollten circularpolarisirt sein. Dies ist von Fresnel vollkommen durch eine achromatische Combination von rechts- und linksdrehenden Prismen bestätigt, welche so eingerichtet war, dass sie die Trennung verdoppelte, und er hat gezeigt, dass beide Bündel weder gewöhnliches noch linearpolarisirtes Licht sind, sondern dass sie alle Eigenschaften besitzen, welche ein durch zwei totale Reflexionen von Glas unter einem Winkel von 50° polarisirter Strahl besitzt.

Die Refraktion des Quarzes in der Richtung seiner Axe ist nun gänzlich von der eines jeden andern bekannten Krystalles verschieden. Man nahm an, dass bei andern Richtungen die beiden Bündel, in welche ein einziger Strahl zertheilt wird, den gewöhnlichen Gesetzen folgen, und in entgegengesetzten Ebenen linearpolarisirt seien. Diese Annahme ist von Airy beseitigt[1]), und er hat gezeigt, dass jeder der beiden Bündel im Quarz elliptisch-polarisirt ist; die elliptischen Vibrationen beider Strahlen geschehen

---

1) *„On the Nature of the Light in the two rays produced by the double refraction of Quartz."* Cambridge Transactions 1831. (Poggend. Ann. XXIII. p. 204.)

nach entgegengesetzten Richtungen, und die grösseren Axen der Ellipsen liegen im Hauptschnitt und im senkrechten gegen diesen. Das Verhältniss der Axen in diesen Ellipsen ist bei beiden Strahlen dasselbe[1]); aber es ändert sich mit ihrer Neigung gegen die optische Axe, so dass sie gleich werden, wenn die Richtung des Strahles mit der Axe zusammenfällt, und mit ihrer Neigung gegen diese Linie nach irgend einem unbekannten Gesetze abnimmt. Was den Weg der gebrochenen Strahlen betrifft, so findet AIRY, dass er noch durch das HUYGENS'sche Gesetz bestimmt wird; aber dass die Kugel und das Späroid, welche die Geschwindigkeit und die Richtung beider Strahlen bestimmen, nicht, wie bei allen andern einaxigen Krystallen, einander berühren, indem das letztere gänzlich in der ersteren enthalten ist. Diese Lage ist gewiss auffallend. Da beide Coordinat-Ebenen der Wellenoberfläche also absolut getrennt sind, so findet beim Uebergange von der Geschwindigkeit des einen Strahles zu der des andern eine vollständige Unterbrechung der Continuität statt, ein Resultat, welches in keinem andern unter allen uns bekannten Fällen vorkommt. Indessen ist es zur Erklärung der Erscheinungen nothwendig, denn das Intervall der Verzögerung verschwindet nicht mit der Neigung des Strahles gegen die Axe. AIRY hat eine mühsame, auf diese Hypothese ge-

1) Im Supplement dieser Abhandlung hat AIRY eine höchst sinnreiche Methode auseinander gesetzt, auf experimentellem Wege die Beziehung zwischen der Ellipticität und der Richtung jedes der Strahlen zu bestimmen. Diese Methode hängt von einer merkwürdigen Wirkung ab, welche ihn die Theorie hatte voraussehen lassen; nämlich eine plötzliche Aenderung von einer halben Undulation im Intervall der Verzögerung, und demzufolge eine Aenderung von einer halben Ordnung in den Ringen, wenn das einfallende Licht elliptisch polarisirt ist. Nach den Resultaten einiger, auf diese Weise ausgeführter Versuche scheint AIRY zu glauben, dass das Axenverhältniss im gewöhnlichen Strahle sich mehr dem der Gleichheit nähere, als im ungewöhnlichen Strahle.

gründete Berechnung der Gestalten der Ringe etc. gegeben, durch Quarz in linear- und circularpolarisirtes Licht zerlegt, und bei jeder Stellung der analysirenden Ebene; und er fand die auffallendste Uebereinstimmung zwischen den Resultaten der Berechnung und der Beobachtung.

Jedoch fehlt es noch an einer mechanischen Theorie, welche die so eben angeführte besondere Gestalt der Wellenoberfläche erklärte. FRESNEL scheint geglaubt zu haben, dass die Differenz der Geschwindigkeiten beider Strahlen in der Richtung der Axe physikalisch wohl durch eine schneckenförmige Anordnung der Molekeln des vibrirenden Mediums erklärt werden könnte, welches dann verschiedene Eigenschaften haben würde, je nachdem die Schnecken rechts oder links gewunden sind. Aber man kann schwerlich annehmen, dass diese Hypothese für Flüssigkeiten gelte, in welchen die Eigenschaft der circularen Polarisation unabhängig von der Richtung ist, und wir sind zu dem Geständniss gezwungen, dass die physikalische Theorie, hinsichtlich dieser wichtigen Gesetze, noch äusserst schwierig ist. Die merkwürdige Relation zwischen dem Intervall der Verzögerung und der Länge der Welle scheint den einzigen Leitfaden zur Lösung dieses Problems darzubieten.

Die Erscheinungen der Depolarisation und der Farbe, welche das durch doppelt brechende Substanzen hindurchgegangene Licht zeigt, sind, wie wir gesehen haben, nothwendige Resultate der Interferenz der beiden Bündel, in welche das Licht im Innern derselben zertheilt wird. Diese Eigenschaften nun setzen uns in den Stand, das Vorhandensein der doppelten Brechung sogar in Substanzen zu entdecken und die Gesetze derselben zu verfolgen, in welchen die Trennung beider Bündel zu gering ist, um direkt beobachtet zu werden. Mit solchen Mitteln ist die wichtige Entdeckung gemacht worden, dass eine doppelt brechende Struktur Körpern mitgetheilt werden kann, welche sie von Natur nicht besitzen, und zwar durch mechanisches Zusammendrücken und durch Ausdehnung. DAVID BREW-

Brewster bemerkte, dass wenn auf die entgegengesetzten Flächen eines Glasparallelepipedums ein Druck ausgeübt wird, dieses im polarisirten Lichte eine Farbe entwickelte, wie eine Platte eines doppeltbrechenden Krystalls, und die Farbe stieg in der Skale, wenn der Druck vermehrt wurde. Einfachbrechende Krystalle, wie Steinsalz und Flussspath erlangten durch dieselben Mittel die Eigenschaften der doppelten Brechung [1]). Alles dieses stimmt vollkommen mit der Wellentheorie. Wegen des Zusammenhanges des vibrirenden Mediums mit dem festen Körper, in welchen es enthalten ist, ist die Elasticität desselben durch die Wirkung des Zusammendrückens verschieden nach verschiedenen Richtungen geworden, so dass das Maximum und das Minimum den Richtungen des grössten und kleinsten Druckes entspricht. Demnach werden die Schwingungen des Strahles beim Eintritt in die Platte in zwei nach diesen rechtwinkligen Richtungen zerlegt, und diese werden mit ungleichen Geschwindigkeiten fortgepflanzt; die entwickelte Farbe wird durch das Intervall der Verzögerung bestimmt. Diese Resultate der Theorie wurden von Fresnel auf dem Wege des Experimentes bestätigt, und zwar durch die Methode der Interferenzen, und man fand, dass die Geschwindigkeit, mit welcher ein Strahl das Glas durchdrang, grösser oder kleiner war, je nachdem er parallel oder senkrecht zur Druckaxe polarisirt war. Die Zertheilung des Strahles bei schiefen Incidenzen ist eine nothwendige Folgerung dieses Unterschiedes der Geschwindigkeiten; aber auch dies wurde

---

1) *Phil. Trans.* 1815 u. 1816 (u. 1830; Poggend. Ann. XIX. p. 527.) Durch solche Mittel hat Dove (Poggend. Ann. XXXV. p. 579.) auf sehr sinnreiche Weise auch die Circular-Polarisation künstlich hervorgebracht, und zwar durch Druck und durch Abkühlung, woran sich noch andere Untersuchungen: der Erscheinungen während des Erhitzens und Abkühlens — in verschiedenen Farben des Spektrums — bei combinirten und Zwillingskrystallen anschliessen. A. d. Ü.

von FRESNEL durch direkte Versuche erwiesen. Eine Reihe von Glasprismen wurde mit ihren brechenden Winkeln abwechselnd nach entgegengesetzten Richtungen aneinander gelegt, und die Enden der Prismen stark durch Schrauben zusammengepresst. Ein durch diese Vorrichtung gehender Strahl fand sich in zwei entgegengesetzt polarisirte getheilt [1]).

Die entgegengesetzten Wirkungen der Zusammendrükkung und der Ausdehnung kann man bei einer dicken Glasplatte sehen, welche durch eine äussere Gewalt gebogen wird. Wenn dieser Körper zwischen die polarisirende und analysirende Platte gebracht wird, so dass er mit der Ebene der ersten Polarisation einen Winkel von 45° macht, so sieht man zwei Reihen farbiger Streifen, getrennt durch eine neutrale Linie, und diese verschwinden völlig, wenn die comprimirende Kraft aufhört zu wirken. BREWSTER fand, dass, wenn er quer über das Glas eine Glimmer- oder Gypsplatte legte, die Theile nach der convexen oder der ausgedehnten Seite der neutralen Linie eine positive doppeltbrechende Struktur angenommen hatten, dagegen die nach der concaven oder der zusammengedrückten eine negative [2]). Der innere Zusammenhang zwischen dem Vermögen, doppelt zu brechen, und dem innern Zustande des Körpers, je nach der Verdichtung oder der Ausdehnung, ist gleichfalls durch die sonderbare Beobachtung BIOT's bewiesen, dass Glas, wenn es sich in einem Zustande tönender Vibration befindet, das Vermögen besitzt, das Licht zu depolarisiren.

In diesen Fällen erregter doppelter Brechung haben die Erscheinungen Zusammenhang mit der Gestalt der ganzen Masse, und sind wesentlich von den durch regelmässige Krystalle hervorgebrachten verschieden, bei welchen das Gesetz

---

1) *Annales de Chimie, tom.* XX. (POGGEND. Ann. XIX. p. 539.)

2) *Phil. Trans.* 1816.

der Elasticität und der doppelten Brechung nur von der Richtung abhängt, und in allen Theilen der Substanz dasselbe ist. BREWSTER ist es vor Kurzem gelungen, einer Mischung von Harz und weissem Wachs eine regelmässig doppelt-brechende Struktur dadurch mitzutheilen, dass er sie zwischen zwei Glasplatten zu einem dünnen Häutchen auspresste. Dieses Häutchen hatte eine einzige Axe doppelter Brechung an jedem Punkte in der Richtung der Druckaxe, und die zum Vorschein gekommene Farbe hing nur von der Neigung des Strahles gegen diese Linie ab. DAVID BREWSTER hat aus dieser Erscheinung einige höchst interessante Schlüsse hinsichtlich des Entstehens der doppelten Brechung in regelmässigen Krystallen gezogen. Er erwähnt einiger Thatsachen, welche zu beweisen scheinen, dass diese Eigenschaft nicht den Molekeln selbst anhaftet, und er glaubt, dass sie durch den ungleichen Druck entstehe, welcher durch die Kräfte der Aggregation verursacht wird, und dass diese im Allgemeinen in der Richtung dreier rechtwinkliger Axen verschieden seien. Somit sind die doppeltbrechenden Eigenschaften und die Krystallform auf ein und dieselbe Wirkung zurückgeführt[1]).

DAVID BREWSTER und SEEBECK hatten die durch ungleiche Verdichtung und Ausdehnung bei ungleich erwärmten unkrystallisirten Körpern entstehenden Phänomene beobachtet. Diese Phänomene kann man studiren, wenn man eine heisse Eisenstange auf den Rand einer rechtwinkligen Glasplatte legt, und sie in den Polarisationsapparat bringt, so dass die erwärmte Kante mit der Ebene der ursprünglichen Polarisation einen Winkel von 45° macht. Nach einiger Zeit bemerkt man, dass die ganze Oberfläche der Platte mit farbigen Bändern bedeckt ist, und dass die den entgegengesetzten Kanten nahen Theile eine positiv doppeltbrechende Struktur erlangt haben, die in der Nähe der Mitte

---

1) *Phil. Trans.* 1816. (Im Auszuge: GEHLER's physik. Wörterbuch VII. 2te Abth. p. 814. d. Ü.)

dagegen eine negative. Die Wirkungen werden umgekehrt, wenn eine gleichförmig erwärmte Glasplatte plötzlich an einer ihrer Kanten abgekühlt wird, und alle Erscheinungen verschwinden, wenn das Glas durch und durch dieselbe Temperatur erlangt. Diese Phänomene können unendlich dadurch abgeändert werden, dass man die Gestalt des Glases ändert, welches man erwärmt. Wenn nun durch irgend ein Mittel das Glas in einem dieser vorübergehenden Zustände erhalten wird, so wird es eine dauernde doppeltbrechende Struktur erlangt haben. Diess ist von SEEBECK so ausgeführt, dass er das Glas rothglühend machte, und dann schnell an den Rändern abkühlte. Da die äusseren Theile, welche so dichter werden, beim Abkühlen eine feste Gestalt annehmen, so müssen sich die inneren Theile nach dieser Gestalt bequemen, und daher einen Zustand ungleicher Dichtigkeit behalten. Das Gesetz der Aenderung der Dichtigkeit, und daher auch die doppeltbrechende Struktur wird von der äusseren Gestalt abhängen, und SEEBECK fand demzufolge, dass die farbigen Bänder und Flecken, welche solche Körper im polarisirten Lichte zeigen, eine regelmässige Anordnung annehmen, welche sich mit der Gestalt der Masse ändert [1]). Die Gesetze dieser Erscheinungen sind von BREWSTER vollständig dargelegt worden, und er hat auch gezeigt, dass die Farben die der krystallisirten Platten sind, obwohl die Richtung der Axen in verschiedenen Theilen der Substanz verschieden ist.

Wie die doppeltbrechende Struktur Körpern mitgetheilt werden kann, welche sie nicht besitzen (durch Druck oder ungleiche Temperatur), so kann vielleicht durch Anwendung derselben Mittel diese Struktur in Körpern verändert wer-

---

1) SEEBECK'S Versuche stehen in SCHWEIGGER'S Journal 1814. (VII 284. u. XII. 1.) Die depolarisirende Eigenschaft des nicht besonders zubereiteten Glases scheint ARAGO zuerst bekannt gemacht zu haben, und später wurde sie von BREWSTER im Glase, welches geschmolzen und in Wasser abgekühlt war, untersucht. *Phil. Trans.* 1814.

den, wenn sie sie bereits besitzen. So haben BREWSTER und BIOT gefunden, dass die doppelte Brechung regulärer Krystalle durch blossen Druck verändert werden kann, und dass die Farben, welche sie zeigen, in der Skale auf oder absteigen können. MITSCHERLICH entdeckte das wichtige Faktum, dass im Allgemeinen die Wärme die Krystalle verschieden nach verschiedenen Richtungen ausdehnt, und damit ihre Gestalt ändert; und es fand sich, dass ihre doppeltbrechenden Eigenschaften eine entsprechende Aenderung erleiden. So wird der Doppelspath durch die Wärme nach der Richtung seiner Axe ausgedehnt, während er sich in den senkrechten Richtungen gegen diese um ein Geringes zusammenzieht. Die Winkel der primitiven Form ändern sich also, das Rhomboid wird weniger stumpf[1]), und nähert sich dem Würfel. MITSCHERLICH vermuthete demnach, dass sein Vermögen der doppelten Brechung unter diesen Umständen verringert werden müsste, und der Versuch bestätigte diese Vermuthung vollkommen. Diese Untersuchungen setzte RUDBERG fort, und untersuchte die Wirkung der Wärme auf die Brechungsindices der doppeltbrechenden Krystalle durch die direkte Methode der prismatischen Brechung[2]). In Uebereinstimmung mit MITSCHERLICH'S Beobachtungen fand er, dass der ungewöhnliche Index beim Doppelspath beträchtlich mit der Temperatur zunahm, während der gewöhnliche Index eine geringe oder keine Aenderung erfuhr. Beim Bergkrystall dagegen nehmen beide Indices bei steigender Temperatur ab, und fast um dieselbe Grösse. Beim Arragonit wurde eine ähnliche Wirkung auf die drei Hauptbrechungsindices hervorgebracht; der kleinste derselben erlitt jedoch die verhältnissmässig kleinste Verminderung[3]).

1) Eine Temperaturänderung vom Gefrier- bis zum Kochpunkte brachte eine Aenderung von $8\frac{1}{2}'$ in den Winkeln an den Enden der Axe hervor. *Bull. Soc. Phil.* — März 1824.

2) (POGGEND. XXVI. p. 291.).

3) *Phil. Mag. Third. series. vol. I.* 409.

Die Neigung der optischen Axen in zweiaxigen Krystallen ist eine einfache Funktion der Elasticitäten des vibrirenden Mediums nach den Richtungen der drei rechtwinkligen Axen, und die Ebene der optischen Axen ist die der grössten und kleinsten Elasticität. Wenn nun diese drei Hauptelasticitäten durch die Wärme in verschiedenen Verhältnissen geändert werden, so wird sich die Neigung der Axe gleichfalls ändern; und wenn während dieser Aenderung die Differenz zwischen der grössten und der mittleren, oder zwischen der mittleren und kleinsten Elasticität verschwinden und nachher ihr Zeichen ändern sollte, so werden beide Axen in eine zusammenfallen, und endlich sich in einer zu ihrer ersten senkrechten Ebene öffnen. Alle diese Veränderungen sind wirklich beobachtet worden. MITSCHERLICH fand, dass beim Gyps der Winkel zwischen den Axen (welcher etwa 60° bei der gewöhnlichen Temperatur ist) durch den Einfluss der Wärme kleiner wird; dass bei steigender Temperatur diese Axen sich nähern, bis sie sich vereinigen, und dass bei noch weiterer Erhöhung der Temperatur sie sich wieder sondern, und in einer senkrechten Ebene öffnen. Die primitive Form des Krystalles erleidet eine entsprechende Aenderung, indem die Ausdehnung nach einer Richtung grösser ist, als in einer zu dieser rechtwinkligen. BREWSTER hat eine analoge und sogar noch merkwürdigere Eigenschaft beim Glauberit beobachtet. Beim Gefrierpunkt hat dieser Krystall zwei Axen für alle Strahlen des Spektrums, und die Neigung der Axen ist im rothen Lichte am grössten, und im violetten am kleinsten. Wenn die Temperatur steigt, so nähern sich beide Axen, und die der verschiedenen Farben vereinigen sich nach und nach; und bei gewöhnlicher Temperatur besitzt der Krystall die sonderbare Eigenschaft, einaxig für violettes, und zweiaxig für rothes Licht zu sein. Wenn er noch weiter erwärmt wird, so öffnen sich die Axen, welche sich vereinigt hatten, nach der Reihe, und zwar in einer Ebene, welche rechtwinklig zu der ist, in welcher sie anfangs la-

gen; und bei einer viel niedrigeren Temperatur, als die des kochenden Wassers ist, stehen die Ebenen der Axen für alle Farben senkrecht gegen ihre erste Stellung[1]). Die Neigung der optischen Axen beim Topas dagegen nimmt mit steigender Temperatur zu, und die Veränderung, welche Marx beobachtet hat, ist bei farbigen Stücken weit grösser, als bei farblosen Varietäten[2]).

1) *Edinb. Trans. vol. XI.* und *Phil. Mag., Third series, vol. I.* 417. (Poggend. Ann. XXI. p. 607.)
2) Jahrbuch der Chemie, IX.

Berlin, gedruckt bei C. Feister.